

УДК 662.612

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ

Sh. Liu¹, X.-J. Qiao¹, S.-M. Shi¹, Y.-L. Miao², W.-N. Liu¹¹Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, Китай, qxjbit84@163.com²Пекинский технологический университет, Пекин, Китай

Для обеспечения безопасности и надежности вооружения важно знать влияние внутреннего и наружного диаметров замедлителя (элемента задержки) на время задержки. В статье разработана сопряженная модель жидкости и твердого тела для элементов задержки в виде металлической перегородки с составом задержки на основе кремния. Поле потока при горении в элементе задержки с внутренним диаметром 3, 4 и 5 мм рассчитано в программном комплексе STAR-CD. Предложен новый метод расчета времени задержки теплопроводящим замедлителем. Изучено влияние внешнего и внутреннего диаметров такого элемента на время задержки. Результаты показали, что после сгорания состава задержки температура основного состава постепенно повышается за счет теплопроводности металлической перегородки и в ее центре достигает самого высокого значения. Влияние размера внутреннего и внешнего диаметров замедлителя на время задержки имеет критическую точку равновесия, которая может быть обусловлена балансом между приращением тепла за счет горения и тепловыми потерями.

Ключевые слова: теплопроводность, замедлитель, горение, время задержки, сопряженный теплообмен в жидкости и твердом теле.

DOI 10.15372/FGV20200309

ВВЕДЕНИЕ

В связи с непрерывным развитием военной науки и техники активно развивается технология миниатюризации оборудования. Миниатюризация требует разработки элементов задержки (замедлителей) с большим временем задержки и высокой точностью его определения, которые до сих пор не созданы.

Технология тепловой задержки основана на использовании теплопроводности для достижения длительного времени задержки [1–4]. Такие элементы задержки разработаны многими исследователями. Например, в [5] сконструирован детонатор с задержкой срабатывания за счет теплопередающего стержня. В [6] в качестве элемента задержки применялась вогнутая теплообменная пластина, общее время задержки составило 20 мс ÷ 20 с. В [7, 8] описан элемент задержки на основе теплопроводности с временем задержки несколько миллисекунд для работы наддувной подушки безопасно-

сти. Использование этих элементов задержки осложнено проблемой низкой точности величины задержки и множеством факторов, оказывающих на нее большое влияние: длительность горения состава задержки, втулка [9], толщина перегородки, внутренний и внешний диаметры элемента задержки.

В данной работе разработан элемент задержки с металлической перегородкой, за счет теплопроводности которой достигается увеличение времени задержки. Для элемента задержки с различными внутренними и внешними диаметрами разработана модель сопряженного теплообмена, а для расчета теплопроводности использован программный комплекс STAR-CD. Для определения влияния внешнего и внутреннего диаметров элемента задержки с помощью нового метода рассчитаны время задержки и температура точки взрыва.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1. Элементы тепловой задержки и материалы

В данной работе в качестве элемента тепловой задержки используются цилиндрические оболочки с полостями на обоих концах (рис. 1).

© Liu Sh.¹, Qiao X.-J.¹, Shi S.-M.¹, Miao Y.-L.², Liu W.-N.¹, 2020.

¹School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. ²Department of Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing, China.

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов

Состав задержки			Основной состав		Сталь (цилиндрическая оболочка)		
Q , кДж/кг	v , мм/с	ρ , кг/м ³	Q , кДж/кг	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)
12073	17.87	2800	2385.97	2387	16.2	8930	473



Рис. 1. Схема элемента тепловой задержки

Оболочка изготовлена из нержавеющей стали. Левая полость заполнена составом задержки на кремниевой основе, правая — основным составом. Длина левой полости составляла 14 мм, правой — 3 мм, толщина перегородки 2 мм. В качестве состава задержки использовано вещество $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{CMC}-\text{Na}$, которое воспламеняется первичным составом зажигания. В качестве основного состава использовано вещество $\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}_3/\text{AgNO}_3/\text{KNO}_3/\text{Mo}$ [10–12]. Теплофизические свойства этих веществ измерены экспериментально, результаты приведены в табл. 1. Теплоту сгорания Q составов определяли с помощью адиабатического калориметра. Скорость горения v измеряли методом, описанным в § 1.2. Данные о теплофизических свойствах стали (теплопроводность λ , удельная теплоемкость c , плотность ρ) взяты из литературы [13].

1.2. Измерение времени задержки и скорости горения

Фотоэлектрические сигналы регистрировали люксометром. Время задержки определялось как разница между начальным и конечным сигналами. Скорость горения была рассчитана как отношение длины состава задержки к времени горения.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА ЗАДЕРЖКИ

2.1. Предположения модели

(1) Горение состава задержки является стационарным процессом, поэтому скорость горения постоянна.

(2) Состав задержки горит послойно до полного сгорания. Процесс может быть разделен на зону без реакций, предреакционную зону (область предварительного нагрева), зону горения и зону выхода. Тепло от экзотермической реакции в зоне горения подогревает зону предварительного нагрева. Температура в зоне предварительного нагрева достигает температуры реакции, после чего она воспламеняется и становится зоной горения. Зона горения выделяет тепло в следующую зону подогрева, в результате происходит послойное горение.

(3) Все параметры модели имеют осевую симметрию. В качестве расчетной области рассматривалась четверть трехмерной цилиндрической области.

2.2. Теоретическая модель

Модель волны горения включает в себя уравнения законов сохранения массы, импульсов, энергии, уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации [14–17]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_m) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j m_m - F_{m,j}) = s_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_t) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j h_t - F_{h_t,j}) =$$

$$= \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_j p) - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} +$$

$$+ \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h - \sum_m H_m s_{c,m}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \\ = \mu_t \left(2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - \\ - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \tilde{u}_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \\ = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t \left(2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - \right. \\ \left. - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - \\ - \left(C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right) \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \\ + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i}. \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь ρ — плотность; m_m — массовая доля компонента m смеси; x_j — j -е направление в декартовой системе координат; $F_{m,j}$ — диффузия течения компонента m в направлении j ; \tilde{u}_j — относительная скорость смеси в направлении j ; S_m — источник массы; u_i — абсолютная скорость в направлении i ; τ_{ij} — тензор напряжений; s_i — источник в уравнении моментов; S_h — источник в уравнении энергии; H_t — энтальпия; H_m — теплота образования компонента m ; $S_{c,m}$ — скорость, с которой компонент m образуется или потребляется в химической реакции; $F_{h,j}$ — тепловая диффузия в направлении j ; $\sigma_{h,t}$ — турбулентное число Прандтля; k — турбулентная кинетическая энергия; μ_{eff} — эффективный коэффициент турбулентной вязкости; g_i — ускорение свободного падения в направлении i ; ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; $C_{\varepsilon i}$ — эмпирические коэффициенты.

В качестве модели турбулентности используется RNG-модификация k - ε -модели турбулентности, которая имеет более широкий

диапазон применимости, чем стандартная k - ε -модель, и большую точность вычисления после дискретизации [18, 19].

Тепло, выделившееся в процессе горения состава задержки распространяется в металлической оболочке в соответствии с уравнением

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right), \quad (6)$$

где T_s — температура материала оболочки, ρ_s — его плотность, c_s — удельная теплоемкость, λ_s — коэффициент теплопроводности материала оболочки.

Продукты горения состава задержки и термодинамические параметры реакций вычислены с использованием принципа минимума свободной энергии. Для смеси из n компонентов свободная энергия Гиббса может быть записана в виде

$$G = \sum_{j=1}^n \zeta_j n_j. \quad (7)$$

Здесь n_j — количество молей j -го компонента, ζ_j — химический потенциал j -го компонента, описываемый формулой

$$\zeta_j = \begin{cases} \zeta_j^0 + RT \ln(n_j/n) + RT \ln(p/p^\varphi), & j = 1, \dots, m, \\ \zeta_j^0, & j = m + 1, \dots, n, \end{cases} \quad (8)$$

в которой газообразные компоненты обозначены номерами от 1 до m , конденсированные — от $m + 1$ до n , ζ_j^0 — химический потенциал j -го компонента при стандартных условиях, p^φ — стандартное атмосферное давление.

2.3. Вычисление времени задержки и температуры воспламенения

(1) В качестве расчетной области выбрана четверть трехмерной цилиндрической области, в которой построена структурированная гексаэдральная сетка (рис. 2).

(2) Поставлены граничные условия. Поверхности 1 и 2 определены как симметричные границы. Поскольку металлический корпус покрыт теплоизоляционной оболочкой, на остальных поверхностях задано условие теплоизоляции.

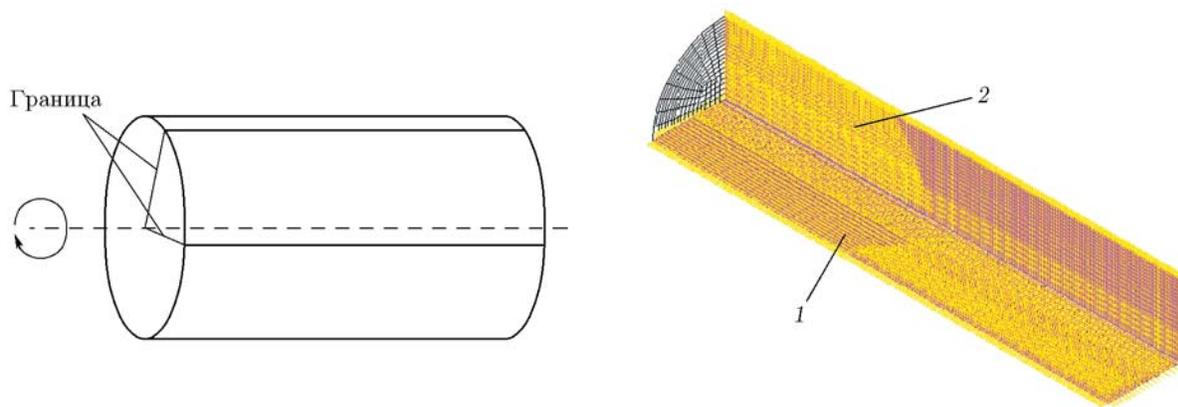


Рис. 2. Расчетная область (слева) и гексаэдральная сетка (справа)

Таблица 2

Эмпирические константы RNG k - ε -модели турбулентности

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 4}$	C_{μ}	σ_k	σ_{ε}	σ_h	σ_m	κ	η_0	β	f_{μ}
1.42	1.68	-0.387	0.085	0.719	0.719	0.9	0.9	0.4	4.38	0.012	1.0

(3) Заданы временной шаг и полное время решения. Для обеспечения нужной точности временной шаг составлял 5 мс, а общее количество шагов по времени равнялось 1000.

(4) Установлена подпрограмма генерирования продуктов горения. Для того чтобы более точно описывать быстрое сгорание пиротехнического состава и процесс предварительного нагрева и теплообмена с несгоревшей частью состава, область состава задержки была разрезана по оси на несколько слоев толщиной 0.1 мм.

(5) Для расчета поля температуры модели, на основании которого может быть получена зависимость между температурой правой торцевой поверхности металлической перегородки и временем теплопроводности, используется программный пакет STAR-CD. В численных расчетах необходимо задать теплофизические свойства всех материалов. В области решения есть три вида веществ: состав задержки, основной состав и оболочка из нержавеющей стали марки 304. Их физические свойства приведены в табл. 1. Термодинамические параметры состава задержки были рассчитаны при помощи программы REAL. Теплоемкость состава задержки при постоянном давлении, вычисленная по данной программе, составила $c_p = 2123.63$ Дж/(кг·К), а при постоянном объеме — $c_v = 1731.91$ Дж/(кг·К). Температура горения основного состава равна 3000 К, теп-

лоемкость $c_v = 2873.47$ Дж/(кг·К). Эмпирические константы RNG k - ε -модели турбулентности представлены в табл. 2.

(6) Соотношение между временем задержки и температурой основного состава получено экспериментально.

(7) Добавляя время распространения тепла к времени задержки воспламенения при данной температуре, получаем соотношение между температурой и полным временем процесса. Время, соответствующее минимальному значению на этой зависимости, является временем задержки теплопроводящим замедлителем, а соответствующей температурой является температура зажигания основного состава.

3. ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ДИАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА ЗАДЕРЖКИ

3.1. Распределение температуры

В данной работе моделируются элементы задержки трех размеров (табл. 3).

Температура левой части элемента задержки намного выше, чем у расположенного справа основного состава, поэтому распределение температуры основного состава представлено отдельно, чтобы лучше показать распределение температуры всего элемента задержки. Распределение температуры горения первого образца иллюстрирует рис. 3. Видно, что

Таблица 3

Размеры элемента задержки

Номер образца	Диаметр, мм		Толщина перегородки, мм	Длина полости, мм	
	внутренний	внешний		левой	правой
1	3	4	2	14	3
2	4	5	2	14	3
3	5	6	2	14	3

волна горения продвигается в осевом и радиальном направлениях и температура в центре трубы около оси самая высокая.

Зона предварительного прогрева в первом образце элемента задержки шире по сравнению со вторым и третьим образцами. Это происходит из-за небольшого внутреннего диаметра, что способствует распространению тепла в осевом направлении. Рис. 3 показывает, что скорость движения пламени небольшая. В то же время видно, что температура основного состава третьего образца элемента выше, чем первого и второго. Это означает, что основной состав третьего образца элемента задержки прогревается раньше, чем в первом и втором образцах. Причина этого заключается в том, что масса состава задержки в третьем образце составляет 156 % от второго и 277 % от первого. Соответственно, чем больше масса состава задержки, тем больше теплота сгорания.

3.2. Время задержки

Расчетные температурно-временные зависимости для левой торцевой поверхности основного состава в различных элементах задержки представлены на рис. 4.

Скорость нагрева основного состава в образцах элементов задержки разных диаметров различна. По мере того как внутренний диаметр уменьшается, скорость нагрева увеличивается. Скорости нагрева основного состава во втором и третьем образцах элемента задержки с внутренним диаметром 4 и 5 мм близки друг к другу. Однако скорость нагрева у первого образца с внутренним диаметром 3 мм, очевидно, выше, чем у второго и третьего. Экспериментальные результаты определения температуры воспламенения с использованием ванны со сплавом Вуда показали, что соотношение между временем, которое необходимо для воспламенения основного состава $\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}_3/\text{AgNO}_3/\text{KNO}_3/\text{Mo}$ (время за-

держки τ), и температурой T теплоносителя можно описать формулой

$$\tau = 3.436 \cdot 10^{-7} \exp\left(\frac{7626.8}{T}\right).$$

В результате суммирования времен двух кривых (зависимость времени запаздывания момента взрыва τ от температуры и зависимость температуры левого торца основного состава от времени в результате теплопроводности) может быть получена температурно-временная зависимость полной задержки.

Результирующие зависимости показаны на рис. 5. Соответствующие уравнения приведены ниже:

первый образец

$$y = 1086.70446 - 5.89973x + 0.01069x^2 - 6.45412 \cdot 10^{-6}x^3; SD = 4.38955; R = 0.99512,$$

второй образец

$$y = 1076.33877 - 5.84129x + 0.01059x^2 - 6.38563 \cdot 10^{-6}x^3; SD = 4.44134; R = 0.99458,$$

третий образец

$$y = 1075.59853 - 5.83728x + 0.01058x^2 - 6.38057 \cdot 10^{-6}x^3; SD = 4.44516; R = 0.99459.$$

Согласно рис. 5 время, соответствующее точке минимума на зависимости, является временем задержки, а температура для этой точки — это температура воспламенения основного

Таблица 4

Время задержки τ
различных теплопроводящих замедлителей
и температура зажигания T основного состава

Номер образца	Диаметр, мм		τ , с	T , К
	внутренний	внешний		
1	3	4	2.93	565
2	4	5	3.55	553
3	5	6	3.48	553

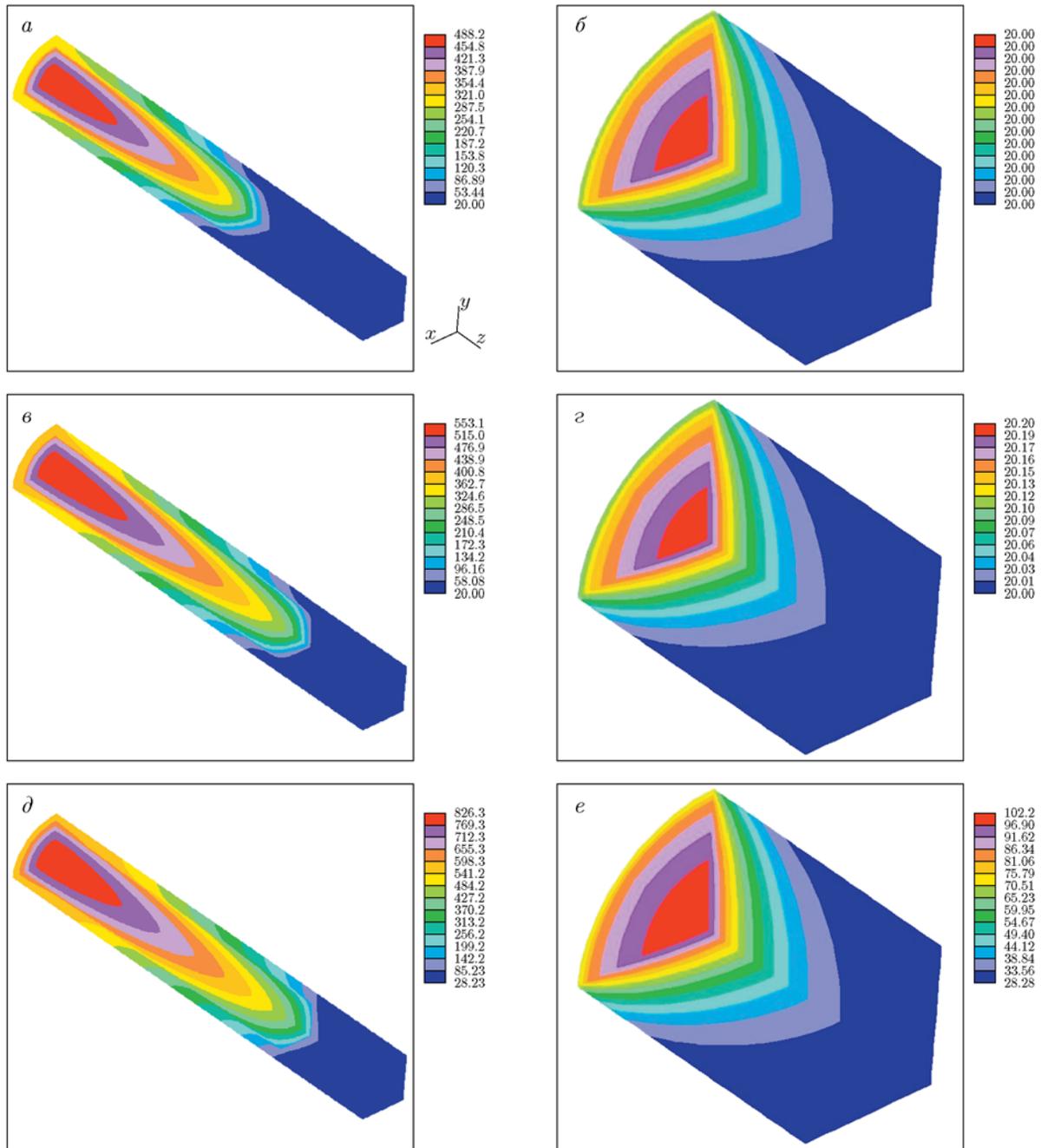


Рис. 3. Распределение температуры горения первого образца элемента задержки:
a, б — $t = 0.6$ с; *в, з* — $t = 0.75$ с; *д, e* — $t = 1.5$ с; справа — распределение температуры в основном составе; шкала температуры индивидуальная для каждого фрагмента, красному цвету соответствует максимальная температура данной шкалы, синему — минимальная

го состава. Как показано в табл. 4, времена задержки при различных внутренних и внешних диаметрах элементов задержки и температуры зажигания основного состава различаются.

Как видно из табл. 4, время задержки для второго образца элемента самое большое, пер-

вого — самое короткое. Температура зажигания основного состава во втором образце такая же, как в третьем, но ниже, чем в первом образце. Время задержки изменяется не прямо и не обратно пропорционально изменению внутреннего диаметра элемента. Существует кри-

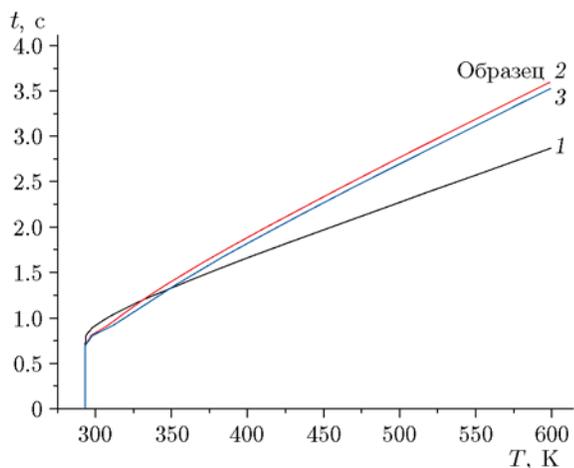


Рис. 4. Температурно-временные зависимости для левой торцевой поверхности основного состава в различных образцах элемента задержки

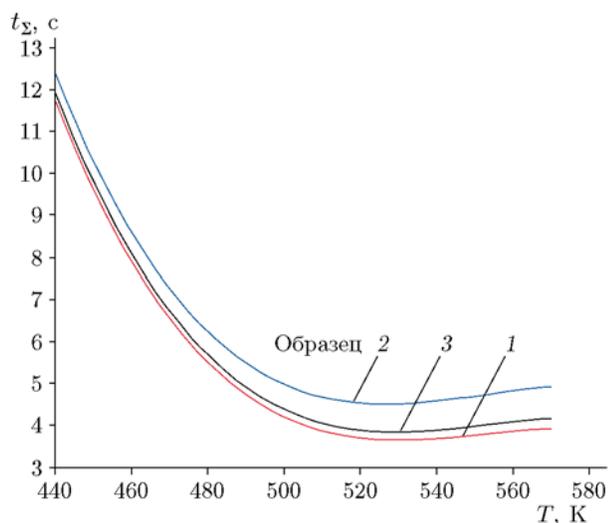


Рис. 5. Соотношение между полным временем и температурой горения левой торцевой поверхности основного состава

тическая точка равновесия между внутренним и внешним диаметрами и временем задержки, т. е. баланс между приращением тепла за счет горения и потерей тепла в результате его диссипации. Когда количество тепла, выделяемого при сгорании, недостаточно для компенсации потерь тепла из-за изменения размеров, время задержки увеличивается, и, наоборот, когда прирост тепла достаточен для компенсации потерь тепла из-за изменения размеров, время задержки сокращается. Второй образец, по сравнению с первым и третьим, находится

Таблица 5
Результаты численного моделирования и экспериментов по времени задержки

Номер образца	Время задержки, с		Расхождение, %
	расчет	эксперимент	
2	3.55	2.97	19.5
4	4.35	4.03	7.9
5	3.91	3.45	13.3

Примечания. Образец 2 соответствует образцу 2 из табл. 3, 4. Внутренний диаметр образцов 2, 4, 5 составляет 4 мм, внешний диаметр — 5 мм. Толщина перегородки: образцы 2, 5 — 2 мм, образец 4 — 3 мм. Состав задержки: L — образцы 2, 4, G — образец 5.

в этой критической точке баланса. Он имеет наибольшее время задержки.

3.3. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Элементы задержки с внутренним диаметром 4 мм были заполнены под давлением 1.21 МПа составами задержки G и L с порошками кремния, изготовленными различными производителями. Определенные в экспериментах времена задержки приведены в табл. 5 в сопоставлении с результатами расчетов.

Из табл. 5 видно, что время задержки, полученное в эксперименте, хорошо согласуется с результатами расчета. Последние не более чем на 20 % превышают соответствующие экспериментальные данные. На основании исследований сделан вывод о том, что модель элемента тепловой задержки, разработанная в данной работе, может быть использована для конструирования и планирования экспериментов с элементами задержки аналогичной структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод вычисления времени задержки теплопроводящим замедлителем. Этот метод позволяет изучать динамическое поведение состава задержки, рассматривая состав и структуру элемента задержки как единое целое. Данный метод может стать базисом для оптимального подбора различных составов задержки и конструкции самого элемента задержки, что может существенно сократить объем экспериментов, необходимых для выбора состава и дизайна элемента задержки.

Проведено моделирование новым методом различных элементов задержки. В полном времени задержки учтены время горения состава задержки, время теплопередачи через металлическую перегородку и время задержки воспламенения основного состава. Время задержки, полученное численным моделированием с использованием пакета STAR-CD, хорошо согласуется с экспериментальными данными. Из распределения температуры следует, что волна горения распространяется в осевом и радиальном направлениях и температура в центре трубы около оси максимальная. Существует критическая точка равновесия между значениями внутреннего и внешнего диаметров и временем задержки, и она может быть связана с балансом между приращением тепла от горения и диссипацией тепла.

Авторы выражают благодарность Национальному фонду естественных наук Китая за финансовую поддержку (грант 11672041) и Пекинскому педагогическому университету за предоставление экспериментальной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Knowlton G. D., Anderson B. B., Gortemoller T. B.** Heat transfer delay: US Patent 6298784. — 2001.
2. **Knowlton G. D., Salafia C., Anderson B. B., Gortemoller T. B.** Heat transfer initiator: US Patent 6539869. — 2003.
3. **Aubé R.** Delay compositions and detonation delay devices utilizing same: US Patent 8066832. — 2011.
4. **Morgan C. G., Rimmington C.** Manufacture of pyrotechnic time delay compositions: US Patent 8118956. — 2012.
5. **Jacques L.** Delay action blasting cap: US Patent 2506157. — 1950.
6. **Evans J. H.** Delay device having dimpled transfer disc: US Patent 3999484. — 1976.
7. **Schneiter F. E., Cadwell D. C.** Igniter for a pyrotechnic gas bag inflator: US Patent 4358998. — 1982.
8. **Walker K. C., Parkinson D. W.** Generant wafer core ignition system for passenger side airbag inflator: US Patent 5593181. — 1997.
9. **Miao Y.-L., Qiao X.-J., Li W., Ren Q. G., Sun Z.-G.** Numerical simulation and experimental study on input and output characteristic of second-level clapboard delay equipment // Trans. Beijing Inst. Technol. — 2012. — V. 9. — P. 895–899.
10. **Seeger D. E., Adams J. H.** Autoignition composition for an airbag inflator: US Patent 5831207. — 1998.
11. **Canterberry J. B., Grzelczyk C.** Low temperature autoignition material: US Patent 6645326. — 2003.
12. **Knowlton G. D., Ludwig C. P.** Low temperature autoignition composition: US Patent 6749702. — 2004.
13. **Mills K. C., Su Y. C., Li Z. S., Brooks R. F.** Equations for the calculations for the thermal-physical properties of stainless steel // ISIJ Int. — 2004. — V. 10. — P. 1661–1668.
14. **Warsi Z. V. A.** Conservation form of the Navier — Stokes equations in general nonsteady coordinates // AIAA Journal. — 1981. — V. 9. — P. 240–242.
15. **Yakhot V., Orszag S., Thangam S., Gatski T., Speziale C.** Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique // Phys. Fluids. — 1992. — V. 7. — P. 1510–1520.
16. **Hinze P. O.** Turbulence. — New York: McGraw-Hill, 1975.
17. **Turbulent Reacting Flows** / F. A. Williams, P. A. Libby (Eds). — Berlin: Springer Verlag, 1980. — (Topics in Appl. Phys.; V. 44).
18. **Lauder B. E., Spalding D. B.** The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. — 1974. — V. 3. — P. 269–289.
19. **Norris L. H., Reynolds W. C.** Turbulent channel flow with a moving wavy boundary // Rep. FM-10, Department of Mechanical Engineering, Stanford Univ., USA, 1975.

Поступила в редакцию 14.03.2019.

После доработки 15.07.2019.

Принята к публикации 28.08.2019.