<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

УДК 621.45.053

Управление изменением поверхности горения зарядов твердого топлива за счет применения теплопроводных элементов

С. К. Савельев¹, Д. К. Щеглов^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Акционерное общество «Конструкторское бюро специального машиностроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе известных экспериментальных данных по локальным значениям скорости горения конденсированных систем вдоль размещенных в них теплопроводных нитей построены регрессионные модели, связывающие значение локальной скорости горения с такими характеристиками теплопроводных нитей, как коэффициент температуропроводности и температура плавления. На основе полученной регрессионной модели оценено возможное расширение диапазона изменения локальной скорости горения при использовании в качестве теплопроводных нитей различных кристаллических форм CVD-алмазов. Показано, что локальное увеличение скорости горения может достигать 200-кратного превышения над базовым уровнем.

Показана возможность управления трансформацией поверхности горения за счет использования теплопроводных нитей с переменными характеристиками.

Ключевые слова: заряд твердого топлива, управление изменения поверхности горения, теплопроводные элементы

Для цитирования: Савельев С. К., Щеглов Д. К. Управление изменением поверхности горения зарядов твердого топлива за счет применения теплопроводных элементов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

For citation: Saveliev S. K., Shcheglov D. K. Controlling changes in the combustion surface of solid fuel charges through the use of heat-conducting elements // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

Поступила 24.11.2020 Отрецензирована 11.12.2020 Одобрена 03.02.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение

Еще в 40-е годы XX столетия было обнаружено, что локальную скорость горения конденсированных систем (КС) можно изменять в широком диапазоне значений за счет введения в КС теплопроводных элементов (ТЭ). Как правило, в качестве теплопроводных элементов используются проволоки диаметром от нескольких десятков до трех-четырех сотен микрон. Проволочные ТЭ могут быть выполнены как в виде длинных нитей, располагаемых по оси массива КС, так и в виде коротких

отрезков нитей, хаотически расположенных в массиве КС.

В 60–70-е годы XX столетия вопрос использования ТЭ в КС был подробно исследован экспериментально [1–3]. Параллельно с экспериментальными исследованиями было предложено несколько численных и аналитических моделей, описывающих рассматриваемое явление [4–9]. Особо следует выделить работы Н.Н. Бахмана и И.Н. Лобанова [5, 6], в которых была предложена и проанализирована относительно простая, но в то же время и высокоэффективная аналитическая модель рассматриваемого объекта.

В работах [1–3] были экспериментально определены основные зависимости скорости горения КС от характеристик материала ТЭ и его диаметра, состава КС и давления окружающей среды. Показано, что в одинаковых условиях скорость перемещения горячей поверхности КС вдоль ТЭ (обозначим ее как w), как правило, выше, чем линейная скорость горения (u) этой КС. Отношение скоростей w и u будем называть коэффициентом увеличения скорости горения (КУСГ) КС. Обозначим эту величину как $Ku = w/u$.

В данной работе проведено обобщение известных экспериментальных данных по зависимости Ku от характеристик используемого ТЭ, построена уточненная аналитическая модель воздействия ТЭ на горение КС. На основе полученных результатов рассмотрена возможность расширения диапазона регулирования скорости горения КС с ТЭ.

1. Анализ экспериментальных данных по использованию теплопроводных элементов для регулирования локальной скорости горения

1.1. Известные экспериментальные данные. Анализ неопределенностей

Основным источником экспериментальных данных по влиянию ТЭ на скорость горения является работа [2], в которой представлены данные по коэффициенту увеличения скорости горения Ku вдоль ТЭ для проволок диаметром 200 микрон, выполненных из различных материалов. Данные по КУСГ из [2] и теплофизические характеристики соответствующих материалов ТЭ, принятые авторами данной работы для последующего анализа, представлены в таблице. Последней строкой в таблицу

добавлены данные по характеристикам КС, на котором проводилось определение КУСГ. Точные характеристики этой КС неизвестны, поэтому для нее использованы значения, соответствующие типичным двухосновным КС [10], а вместо температуры плавления $T_{пл}$ взято значение температуры поверхности горения. Для остальных материалов значения коэффициента теплопроводности λ и температуропроводности α приведены для температуры 300 °С (573 К), что примерно соответствует температуре поверхности горячей КС.

Произведем построение регрессионной модели зависимости КУСГ от определяющих эту величину факторов.

Исследователи обсуждаемой проблемы сходятся в том, что в качестве факторов, определяющих КУСГ, должны использоваться коэффициент температуропроводности ТЭ и температура плавления ТЭ.

Определенные проблемы при построении регрессионной модели создает то, что в известных экспериментальных работах отсутствует информация о точности определения значений КУСГ. В связи с этим будем исходить из общих представлений о точности выполнения экспериментов по определению скорости горения КС.

1.2. Построение регрессионных моделей

Рассмотрены две регрессионные модели, различающиеся количеством использованных факторов:

$$Ku = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot \alpha^2 + b_3 \cdot T_{пл}, \quad (1)$$

$$Ku = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot \alpha^2, \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты соответствующих регрессоров, входящих в модель.

Таблица

Свойства материалов ТЭ

Материал	λ , Вт/м·К	α , м ² /с	$T_{пл}$, К	Ku
Сталь	80	2,22965E–05	1477	1,6
Магний (<i>Mg</i>)	156	8,74685E–05	927	1,9
Алюминий (<i>Al</i>)	237	1,02447E–04	937	2,3
Платина (<i>Pt</i>)	72	2,56232E–05	2054	2,9
Вольфрам (<i>W</i>)	174	6,86431E–05	3699	3,6
Медь (<i>Cu</i>)	401	1,19345E–04	1362	4,6
Серебро (<i>Ag</i>)	429	1,7386E–04	1237	5,3
КС	0,16	2,0E–07	577	1,0

При оценке коэффициентов регрессионных моделей следует учитывать то, что в точке факторного пространства, соответствующей КС без ТЭ, значение Ku определяется существенно точнее, чем для горения КС с ТЭ. Абсолютные значения неопределенностей для Ku неизвестны. Анализ полученных ниже моделей показал, что изменение отношения указанных неопределенностей в диапазоне от 2 до 30 дает очень близкие значения коэффициентов модели. Поэтому для определенности положим, что среднеквадратические ошибки определения Ku для всех материалов таблицы (за исключением «КС») одинаковы и в три раза превышают среднеквадратическую ошибку определения Ku для «КС». Приведенные допущения позволяют сформировать весовую матрицу, обеспечивающую учет различного вклада точек факторного пространства в результирующую регрессионную зависимость.

Оценка вектора коэффициентов регрессионного соотношения (1) при сделанных допущениях имеет вид $b^T = (0,972, -3519, 1,069e^8, 7,604e^{-4})$, а для соотношения (2) $b^T = (1,672, 7310, 4,995e^7)$. Качество получающихся зависимостей можно оценить по графику, представленному на рисунке 1, на котором по оси абсцисс откладываются эмпирические значения КУСГ, а по оси ординат – предсказанные значения этой величины, рассчитанные по моделям (1) и (2) в тех же точках факторного пространства, в которых проводились эксперименты.

Данные, приведенные на рисунке 1, показывают, что двухфакторная модель (1) дает существенно лучшее описание, чем однофакторная модель (2). Проверка значимости регрессоров, входящих в эту модель, подтверждает это утверждение. Оценка коэффициента множественной корреляции R модели (1) имеет величину 0,985, и она значима (эмпирическое значение F критерия равно 32,43 при числах степеней свободы 4 и 4) как на уровне 0,95, так и уровне 0,9. На основе приведенных результатов примем для последующего рассмотрения модель (1) в качестве эмпирической модели для описания зависимости КУСГ от характеристик материала ТЭ.

1.3. Экстраполяция в область высоких значений теплопроводности

Предыдущие исследователи рассмотрели применение ТЭ практически из всех доступных на тот момент материалов. Однако вне этого анализа оказался углерод, на основе которого за последнее время были получены очень интересные для развития обсуждаемого направления материалы. Известно, что среди «натуральных» материалов наивысшей теплопроводностью обладает натуральный алмаз [11]. Использование этого материала в рассматриваемой задаче по технологическим причинам не представляется возможным. Однако в настоящее время существует хорошо отработанная технология получения искусственных алмазов CVD diamond.

Произведем оценку возможности расширения диапазона КУСГ за счет использования нити из CVD алмаза. Примем коэффициент температуропроводности такого материала сорта «single crystal, optical grade» на уровне $0,001 \text{ м}^2/\text{с}$ [11]. Расчет по соотношению (1) дает значение Ku около 100, а для поликристаллического алмаза оптического качества, имеющего значение коэффициента температуропроводности на уровне не ниже $0,0005 \text{ м}^2/\text{с}$, дает оценку $Ku = 26$. Таким образом, использование CVD алмазных нитей может позволить принципиально расширить диапазон достижимых

Рис. 1. Треугольники – модель (1), ромбы – модель (2)

скоростей горения КС с возможной перспективой доведения скорости горения по нити до уровня 1 м/с.

Дополнительными положительными преимуществами применения ТЭ из углерода является то, что продукты сгорания такого материала, в отличие от металлических ТЭ, незначительно изменяют результирующий состав продуктов сгорания КС, т.е. не будут приводить к дополнительным потерям удельного импульса даже в случае использования значительного количества ТЭ.

2. Аналитическая модель для скорости горения при использовании теплопроводных элементов

2.1. Анализ и корректировка модели

Бахмана – Лобанова

В работах [5, 6] представлена аналитическая модель, описывающая воздействие ТЭ в форме однородной по длине проволоки постоянного диаметра на скорость горения КС. Эта модель базируется на использовании соотношений, описывающих баланс потоков энергии, поступающей от газовой фазы, затрачиваемой на нагрев ТЭ и прилегающего слоя КС.

Однако при формировании описываемого соотношения авторы [5] для описания потока тепла, снимаемого с проволоки в КС, градиент температуры в КС оценили по величине нормальной скорости горения u , в то время как градиент температуры по нормали к поверхности проволоки в зоне контакта проволоки и КС должен быть выше из-за более высокого значения локальной скорости горения в этой области. Для оценивания этого градиента представляется необходимым использовать локальное значение скорости перемещения фронта горения вдоль проволоки w .

Такая замена заметно усложняет разрешение получаемых соотношений, но обеспе-

чивает более точное описание наблюдаемых данных.

Следуя работе [5], запишем уравнения баланса тепла с учетом сделанного выше замечания

$$\bar{\alpha} \left(T_f - \frac{T_{lq} - T_s}{2} \right) \pi D \Delta = w \pi \frac{D^2}{4} \rho_M C_M (T_{lq} - T_0) + w \pi D \frac{\lambda_{cp}}{w} (T_s - T_0), \quad (3)$$

где Δ – длина отрезка проволоки, который выступает над поверхностью КС, D , ρ_M , C_M – диаметр, плотность и теплоемкость проволоки; λ_{cp} – коэффициент теплопроводности КС; T_0 , T_s и T_{lq} , T_f – температуры начальная, поверхности горячей КС, плавления проволоки и газообразных продуктов сгорания КС соответственно; $\bar{\alpha}$ коэффициент теплообмена между продуктами сгорания и проволокой.

Коэффициент $\bar{\alpha}$ определим по критериальному соотношению для теплообмена на пластине [12]:

$$Nu(D) = 0,332 \sqrt{Re_D}^3 \sqrt{Pr}, \quad (4)$$

в котором Nu , Re , Pr соответственно число Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля. Две первых величины рассчитываются по диаметру проволоки и параметрам продуктов сгорания.

Уравнение (3) содержит две неизвестных величины: локальное значение скорости горения w и длину отрезка проволоки, выступающего в поток Δ .

Для разрешения этой проблемы, следуя соображениям, предложенным в [5], добавим еще одно соотношение теплового баланса между теплом, затрачиваемым на прогрев отрезка проволоки и прилегающего слоя КС от $T = T_0$ до $T = T_s$, и потоком тепла по проволочке в сечении $T = T_s$.

$$w(T_s - T_0) \left(\frac{D}{4} \rho_M C_M + \frac{\lambda_{cp}}{w} \right) = \frac{D^2}{4} \lambda_M \frac{T_{lq} - T_s}{\Delta}. \quad (5)$$

Решая систему соотношений (3–5), получим следующее выражение для локальной скорости горения вдоль ТЭ

$$w = \frac{-2\lambda_{cp}(A+1)+2 \sqrt{\lambda_{cp}^2(A+1)^2 - 4A\lambda_{cp}^2 + D\lambda_m \bar{\alpha} \left(T_f - \frac{T_{lq} - T_s}{2} \right) \left(\frac{T_{lq} - T_s}{(T_s - T_0)(T_{lq} - T_0)} \right)}}{D\rho_M C_M}, \quad (6)$$

где $A = \frac{T_s - T_0}{T_{lq} - T_0}$.

Сравним значения w , рассчитанные из (6), с имеющимися в литературе опытными данными, представленными в таблице.

На рисунке 2 представлено сопоставление экспериментальных данных из таблицы с результатами расчетов по соотношениям (3–5) при следующих значениях параметров КС: $D = 500$ мкм, $\lambda_{cp} = 0,227$ В/м·С, $T_f = 3000$ °С, $T_s = 600$ °С, $T_0 = 25$ °С.

На графике представленном на рисунке 3, отчетливо просматривается квадратичный тренд, удаление которого из теоретической зависимости должно дополнительно существенно повысить прогностическое качество расчетных соотношений.

2.2. Анализ дополнительных возможностей регулирования изменения поверхности горения заряда с помощью теплопроводных элементов

На основе изложенных выше соображений можно предложить новый способ управления изменением поверхности горения зарядов с ТЭ – использование ТЭ с переменными по длине характеристиками, влияющими на значение локальной скорости горения. Как показано выше, таких величины две: диаметр проволоки и теплопроводность.

Представляется, что вторая из этих возможностей проще в реализации, чем первая, и может быть осуществлена за счет нанесения в определенных зонах на теплопроводный элемент того или иного покрытия.

Реализация управления скоростью горения за счет изменения диаметра проволоки, как это видно из графика, представленного на рисунке 4, требует значительных изменений диаметра, что представляется довольно затруднительным.

В данной работе рассмотрим управление скоростью горения при использовании теплопроводных элементов с переменной теплопроводностью. Проиллюстрируем применение данного приема для регулирования характера изменения поверхности горения заряда двигателя ПЗРК 9К38 «Игла» [13].

Схема двигателя этого снаряда и его топливного заряда представлены на рисунке 4.

Заряд двигателя армирован четырьмя серебряными теплопроводными нитями 6, длина заряда равна 9,5 диаметра. При этом заряд горит по заднему торцу 5, конической поверхности 4 и пазам 3. Боковая поверхность 2 и передний торец 1 забронированы.

В случае использования однородных по структуре теплопроводных нитей, расположенных параллельно оси заряда, изменение

Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений локальной скорости горения: точки – экспериментальные значения скоростей, крестики и линия – расчетные значения

Рис. 3. График невязок между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента скорости горения K_v для случая, рассмотренного на рисунке 2

Рис. 4. Схема двигателя и топливного заряда снаряда ПЗРК 9К38 «Игла»

площади горения заряда и, соответственно, внутрикамерного давления и тяги показано на рисунке 5.

При работе такого двигателя возникает существенный провал в площади горения (и тяги) при переходе со стартового режима на маршевый. Устранение указанного провала возможно при использовании нитей с переменной теплопроводностью.

Для решения проблемы проанализировано несколько версий заряда, различающихся как длиной части нити с напылением, так и количеством нитей с напылением.

Рассмотрим две версии заряда, в которых удалось устранить провал в диаграмме поверхности горения.

Рис. 5. Площадь горючей поверхности в зависимости от толщины сгоревшего свода для заряда с однородными по длине серебряными нитями

На рисунке 6 показан характер изменения площади горючей поверхности для случая, когда на все четыре нити нанесено алмазное покрытие с их начала и на длину, обеспечивающую смену материала нити при прохождении через нее фронта горения от боковых пазов. При этом удалось полностью убрать просадку площади горючей поверхности. На стартовом режиме работы наблюдается несколько периодических скачков площади горючей поверхности, однако их изменения принципиально меньше, чем провал на графике, представленном на рисунке 5, и при необходимости могут быть скомпенсированы дополнительной корректировкой теплопроводности нити.

Рис. 6. Площадь горючей поверхности для заряда с нитями с алмазным напылением на стартовом режиме

На рисунке 7 показан вариант, когда алмазное покрытие нанесено только на две диаметрально противоположные нити и покрытие начинается только при вскрытии нитей фронтом горения от боковых пазов. В данном варианте заряда имеет место провал площади горения на переходе между стартовым и маршевым режимами, но его величина значительно меньше, чем в исходном конструктивном решении.

Для наглядности разница площадей в критических точках (точках перехода между режимами) представлена на рисунке 8.

В случае 8б сразу после завершения первого режима горения конусы занимают всю горящую поверхность, и в результате получается торцевое горение с повышенным газопритоком. В случаях 8а и 8в к моменту достижения критической точки конусы не успевают расшириться на всю величину горячей поверхности, поэтому поверхности горения в двух рассматриваемых случаях представляют собой совокупность поверхностей конусов и разгоревшихся поверхностей от боковых пазов.

При желании приведенные режимы могут быть дополнительно оптимизированы, но поскольку целью данной работы является демонстрация принципиальных возможностей предлагаемых методов регулирования изменения поверхности горения заряда твердого топлива с использованием ТЭ, то такая работа не производилась.

Рис. 7. Площадь горячей поверхности для заряда в случае нанесения алмазного покрытия на две из четырех теплопроводных нитей

Заключение

Проведен анализ эмпирических данных по коэффициенту увеличения скорости горения КС с ТЭ в зависимости от физических характеристик используемого материала ТЭ. Построены однофакторная и двухфакторные регрессионные модели для коэффициента увеличения скорости горения в зависимости от теплопроводности и температуры плавления материала ТЭ. Указано на возможность увеличения коэффициента увеличения скорости горения в 5–20 раз при использовании алмаза для изготовления нитей.

Произведена коррекция метода Бахмана – Лобанова для описания зависимости скорости горения КС с теплопроводными нитями.

Предложены новые способы управления поверхностью горения в зарядах с теплопроводными элементами, расширяющие возможности по совершенствованию таких зарядов.

Рис. 8. Модели заряда в критической точке: а – заряд с серебряными нитями, б – заряд с нитями с алмазным напылением на 4 нити на длине стартового режима двигателя, в – заряд с нитями с алмазным напылением на двух нитях на участке перехода к маршевому режиму

Список литературы

1. Golub G. The need for a variable burning rate solid propellant // AIAA Paper #64-372, 1964. 8 p.
2. Golub G. // Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 4, Feb. 1965. P. 593–594.
3. Kubota N., Ichida M., and Fujisawa T., Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires / AIAA Journal, Vol. 20, No. 1, 1982. P. 116–121.
4. Caveny L.H., Click R.L. Influence of Embedded Metal Fibers on Solid-Propellant Burning Rate / Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 4, Jan. 1967. P. 79–85.
5. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние теплопроводных элементов на скорость горения // Физика горения и взрыва. 1975. Т.11, № 3. С. 501–50.
6. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние диаметра теплопроводящих элементов на их эффективность при горении конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 46–50.
7. Gossant F. Godfroy, and PH. Robert. Theoretical Calculus of Burning Rate Ratio in Grains with Embedded Metal Wires // AIAA-88-3255. 1988. 12 p.
8. Merrill K. King. Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics / J. Propul. Power Vol. 7, 1991. P. 312–21.
9. Coats D.E., French J.C., Dunn S.S., Berker D.R. Improvements to the Solid Performance program (SPP) // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-2003-4504, 2003. P. 7–26.
10. Lengelle G., Duterque J., Trubert J.F. Combustion of Solid Propellants. Energetics Department Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), 2004. 64 p.
11. The Element six CVD diamond handbook. De Beers Group Company. Element Six 2015. 02/16 [электронный ресурс], URL: https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook.pdf (дата обращения 11.01.2021).
12. Шорин С.Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1964. 490 с.
13. Акулов И.Е., Байдаков В.И., Васильев А.Г. Техническая подготовка командира взвода ПЗРК 9К38 «Игла» (учебное пособие). – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2011. 191 с.

Об авторах

Савельев Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Ракетостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: инженерные расчеты, экспериментальные методы исследования высокочастотных потоков, внутренняя баллистика, аналитическое приборостроение.

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент, начальник расчетно-исследовательского отделения Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», заведующий базовой кафедрой «Средства ВКО и ПВО» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: инженерные расчеты, методы проектирования сложных технических систем, системный анализ, промышленная автоматизация, управление проектами, методы и средства цифровой трансформации предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности.

Controlling changes in the combustion surface of solid fuel charges through the use of heat-conducting elements

Saveliev S. K.¹, Shcheglov D. K.^{1,2}

¹ *Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation*

² *JSC “Design Bureau of Special Mechanical Engineering”, Saint-Petersburg, Russian Federation*

On the basis of experimental data on the local values of the combustion rate of condensed systems along the heat-conducting filaments placed therein, regression models were constructed to relate the value of the local combustion rate with such characteristics of heat-conducting filaments as the thermal diffusivity and melting point. The obtained regression model was used to assess a possible expansion of the variation range of the local combustion rate when using various crystalline forms of CVD diamonds as heat-conducting filaments. It was shown that a local increase in the combustion rate could exceed the baseline value by 200 times. The possibility of controlling the transformation of the combustion surface by using heat-conducting filaments with variable characteristics was confirmed.

Keywords: solid fuel charge, combustion surface change control, heat transfer elements

Information about the authors

Saveliev Sergey Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Rocket Engineering Department, Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation

Research interests: engineering calculations, experimental methods for studying high-energy flows, internal ballistics, analytical instrumentation.

Shcheglov Dmitry Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Calculation and Research Department, JSC “Design Bureau of Special Mechanical Engineering”, Head of the Base Department “Aerospace Defence and Air Defence Technologies”, Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation
Research interests: engineering calculations, methods for designing complex technical systems, system analysis, industrial automation, project management, methods and means of digital transformation of enterprises in high-tech industries.