

## ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК 536.46

**Козин В. С.**

*Институт технической механики НАНУ и ГКАУ, г. Днепр, Украина*

*E-mail: vako@email.ua*

### **Особенности горения твёрдых ракетных топлив с микродисперсным и наноалюминием**

*Выявлена роль лучистого теплообмена при увеличении скорости горения топлива с микродисперсными размерами алюминия в сопоставлении с известными результатами испытаний. Произведен расчёт оценок и сравнение с известными результатами экспериментов. Установлено соответствие характеристик изменения скорости горения твёрдого ракетного топлива с нанодисперсным алюминием от изменения лучистого теплообмена при горении перхлората аммония от радиационной температуры.*

**Ключевые слова:** *лучистый теплообмен, скорость горения, ракетное топливо, наноалюминий.*

**Введение.** Одной из фундаментальных нерешённых на сегодня проблем ракетной техники является создание управляемого РДТТ. Успехи в увеличении скорости горения при использовании в порохах субмикронного и нано- алюминия вызвали желание регулировать этот параметр по формуле Аррениуса. Скорость горения ТРТ, как скорость реакции на поверхности по закону Аррениуса [1], будет записана

$$U = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где  $U_0$  – некоторый коэффициент с размерностью скорости горения, являющийся частотным фактором, характеризующим столкновение реагирующих молекул;  $E_0$ ,  $R$  – соответственно энергия активации для твердой фазы и универсальная газовая постоянная,  $R = 8.32$  Дж/град·моль;  $T$  – температура поверхности.

Считается [2], что измельчение алюминия до размеров наночастиц, влияет на параметр  $U_0$ . Но, слишком велика разница в размерах молекул и наночастиц. От 10 до 1000 раз. В данной работе рассматривается механизм влияния горения микрочастиц алюминия на  $E_0$ .

Современной тенденцией в создании твёрдых ракетных топлив является применение в их составе микродисперсного алюминия. При определённых условиях, это даёт возможность без существенного повышения давления усилить лучистый теплообмен в камере сгорания РДТТ и, соответственно, увеличить скорость горения топлива, повысить тягу и увеличить удельный импульс ракетного двигателя. Что и было показано в экспериментах Миланского политехнического университета [1]. В этих работах использовался типовой состав топ-

лива, в котором варьировалась дисперсность помола алюминия: 68% перхлората аммония (ПХА), 17% НТРВ, 15% *Al*. Дисперсность измельчения алюминия в этой работе изменялась от 0.15 мкм до 2.5 мкм, и от 30 до 50 мкм. При этом частицы алюминия размером 50 мкм имели чешуйчатую форму, все остальные – сферическую. В процессе экспериментов по определению скорости горения образцы топлива размером 4.5x4.5x30 мм сжигали в среде азота в бомбе с окнами (закрытыми бронестеклом). Образцы воспламеняли нагретой нихромовой проволокой. Давление в течение всего процесса горения поддерживалось постоянным с помощью системы подачи и контроля газа. Измерения скорости горения проводились в диапазоне давлений 1 – 70 атм. с использованием автоматизированной системы обработки изображений, зарегистрированных скоростной видеокамерой. Каждая экспериментальная точка получена осреднением по нескольким образцам (не менее трех) [1]. При этом, чувствительность скорости горения к вариации давления изменяется слабо. Вследствие высокой реакционной способности наноалюминия, благодаря высокой удельной поверхности порошка наноалюминия и его низкой температуре воспламенения горение металла, по видимому, имеет место в узкой и очень яркой зоне, примыкающей к поверхности горения топлива, что приводит к гораздо более сильному свечению по сравнению с топливом с микронным алюминием [1]. Аналогичная картина горения алюминия у поверхности ТРТ наблюдалась и в [3] при сжигании частиц с дисперсностью 6 мкм в присутствии частиц ПА размером 100 мкм.

Целью настоящей работы является выявление роли лучистого теплообмена при увеличении скорости горения топлива с микродисперсными размерами алюминия в сопоставлении с известными результатами испытаний.

**Обсуждение проблемы.** В упомянутых экспериментах Миланского университета для топлив с мономодальным алюминием было установлено, что увеличение удельной поверхности нанопорошка выше 10 м<sup>2</sup>/г вызывает заметное возрастание скорости горения [1]. Там же было установлено, что замена микронного алюминия с удельной поверхностью 0.1 м<sup>2</sup>/г мономодальным наноалюминием с удельной поверхностью 14 – 15 м<sup>2</sup>/г приводит к двукратному увеличению скорости горения, при этом увеличивается плотность топлива.

В связи с тем, что мощность источников электромагнитного излучения суммируется, увеличение суммарной площади частиц поверхности горящего алюминия может влиять на скорость горения через механизм лучистого теплообмена. Кроме того, одной из особенностей горения смесового ТРТ с добавками алюминия является слияние (агломерация) расплавленных частиц металла и его оксида в поверхностном слое горящего топлива в капли, размер которых на порядок превышает размеры исходных частиц металла [4]. Но, вопреки этому утверждению, приведенные в [4] примеры свидетельствуют об увеличении размеров частиц только в 7.5 раза.

Рассеяние и поглощение теплового излучения определяют частицы алюминия диаметром  $d$  от 2 до 10 мкм, а роль частиц с  $d < 1$  мкм сказывается только при длинах волн  $\lambda < 2$  мкм [5]. То есть в диапазоне инфракрасного излучения. Это и есть значение эффективной длины волны. Знание эффективной длины волны позволяет рассчитать спек-

травный тепловой поток излучения от субмикронного алюминия к поверхности топлива по формуле Вина

$$I_{\lambda} = \frac{2 \cdot C_1}{\lambda^5} \cdot EXP \left[ -\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\lambda}} \right], \quad (2)$$

где  $I_{\lambda}$  – спектральная плотность потока мощности излучения;  $T_{\lambda}$  – радиационная температура частиц алюминия, К;  $\lambda$  – длина волны излучения, см;  $C_1$  – первая постоянная Планка =  $3.732 \cdot 10^{-12}$  Вт·см<sup>2</sup>;  $C_2$  – вторая постоянная Планка = 1.436 см·К.

Связь между реальной температурой  $T$  и радиационной или яркостной температурой  $T_{\lambda}$  определяется следующим соотношением, [6]:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda}} = \frac{\lambda}{1.4380} \cdot \ln \varepsilon(\lambda, T), \quad (3)$$

где  $\varepsilon(\lambda, T)$  – излучательная способность тела на длине волны  $\lambda$ , зависящей от размеров частиц алюминия, при температуре  $T$ .

Считая, что частица алюминия микронного размера находится в состоянии термодинамического равновесия, принимаем  $\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon = 0.19$ , как для окисленного алюминия при температуре 600 °С [7], т.е. излучательная способность равна коэффициенту черноты. Будем считать, что энергетическая светимость частиц металлического горючего будет равна энергетической освещенности топлива, возле которого горит алюминий. Значит, должно быть соответствие между величиной обратной спектральной плотности теплового излучения частиц алюминия и скоростью горения остального топлива, в первую очередь - перхлората аммония.

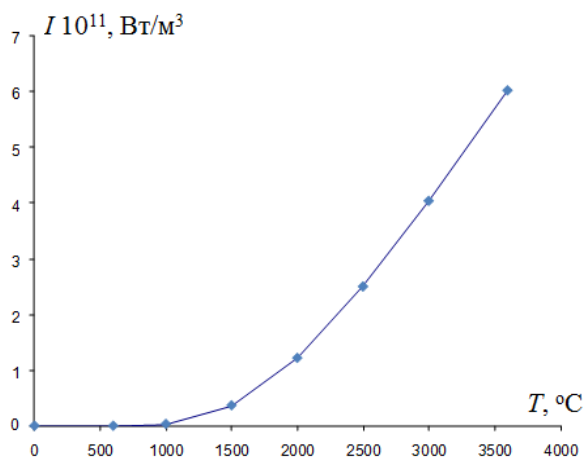
Принимая коэффициент в знаменателе правой части формулы (3) равным постоянной  $C_2$ , получим запись формулы Вина

$$I_{\lambda} = \frac{2 \cdot C_1}{\lambda^5} \exp \left( -\frac{C_2}{\lambda T} - (-1.66) \right). \quad (4)$$

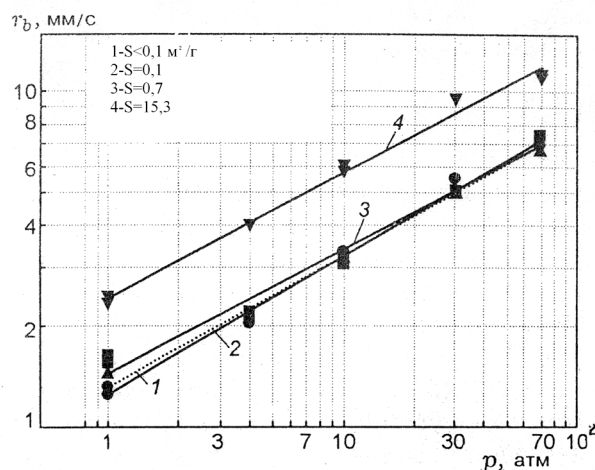
Поток излучения, приходящийся на единицу площади, при фиксированном объеме камеры сгорания, увеличивается с увеличением общего количества излучающих частиц алюминия. На рис. 1 показано изменение этой величины от температуры, посчитанное по формуле (4).

Известно [8], что в интервале температур 400 - 440°С энергия активации перхлората аммония равна 307.546 кДж/моль.

Из графика на рис.1 видно, что такая энергия активации достигается при радиационной температуре алюминия более 2000К. Известно [1], что воспламенение частицы алюминия происходит, когда достигается температура 2320К, при которой происходит плавление окисной пленки частицы. До момента воспламенения экзотермические реакции горения алюминия отсутствуют. Для наночастиц алюминия температура воспламенения меньше и достигает 900К. Мелкие частицы при низких давлениях горят в кинетическом режиме, зависящем от скорости химических реакций [4].



**Рис. 1** Зависимость  $I_\lambda$  алюминия от радиационной температуры по формуле Вина



**Рис. 2** Зависимость скорости горения от давления в КС от удельной поверхности алюминия [1]

График на рис.1 демонстрирует появление дополнительной, по отношению к теплопередаче и конвективному теплообмену, энергии активации окислителя под действием инфракрасного излучения, чем и объясняется увеличение скорости горения ТРТ. При этом, суммарная температура топлива увеличивается на величину радиационной температуры  $T_\lambda$ . Горящие частицы алюминия можно рассматривать как полуволновые вибраторы электромагнитного теплового излучения. Размеры полуволновых вибраторов получаются в результате агломерации. Анализ экспериментов Миланского политехнического университета показывает, что увеличение размеров частиц алюминия при горении от 0.15мкм; 0.2 мкм; 0.4 мкм; 0.8 мкм; 2.5 мкм до половины длины тепловых волн инфракрасного диапазона приводило к более сильному свечению.

Горение в топливе частиц с размерами 30 мкм и 50 мкм эффекта увеличения скорости не давало. Распределение частиц окиси алюминия по размерам является ключевым фактором при исследовании стабильности горения твёрдого топлива [4]. Для заданной частоты колебаний имеется размер частиц, оказывающий наиболее эффективное демпфирующее воздействие на развитие неустойчивости в КС [4]. Демпфирующее воздействие конденсированной фазы пропорционально количеству мелких частиц, образующихся в результате горения. Частицы-агломераты являются слишком крупными, чтобы оказывать влияние на колебания рабочего тела [4].

На рис. 2 показаны кривые зависимости скорости горения топлив с различной дисперсностью алюминия (она выражена через удельную площадь поверхности измельчённого вещества) от крупности частиц. Кривым 1 и 2 соответствуют размеры частиц алюминия 50 и 30 мкм, кривой 3 – размер 2.5 мкм, и кривой 4 соответствует размер 0.15 мкм.

Температура поверхности перхлората аммония, в соответствии с формулой (2) будет зависеть от радиационной температуры алюминия через показатель поглощательной/излучательной способности окислителя. Следовательно, соот-

ветствие на рис.1 энергии активации перхлората аммония спектральной плотности мощности теплового излучения при радиационной температуре горящего алюминия свидетельствует о том, что температура поверхности топлива увеличивается и скорость горения возрастает.

В подтверждение вышеизложенного, приведу пример экспериментов в РФ по зажиганию ТРТ установкой интегрального лучистого нагрева «Уран-1». В спектре инфракрасная составляющая мощностью 2.2 кВт с длиной волны  $\lambda = 0.8 - 1.0$  мкм составляла 40%, а инфракрасная составляющая мощностью 0.88 кВт с длиной волны  $\lambda \geq 1.0$  мкм составляла 16%. Эксперименты показали однозначное воспламенение гетерогенного твёрдого ракетного топлива [9].

То, что излучение с такой длиной волны способно проходить через среду продуктов сгорания в канале заряда РДТТ подтверждается следующими соображениями: 1) огибающие частицы алюминия электромагнитные волны теплового излучения инфракрасного диапазона имеют длину больше этих частиц; 2) частоты инфракрасного излучения до  $3 \cdot 10^{14}$  Гц соответствуют критической электронной концентрации плазмы  $10^{25} \text{ м}^{-3}$  [10], в то время как концентрация электронов в КС при работе РДТТ равна  $1.7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Следовательно, концентрация электронов при горении заряда твёрдого ракетного топлива (ТРТ) не является препятствием для прохождения инфракрасного излучения.

Экспериментальное подтверждение увеличения уровня инфракрасного излучения при сжигании ТРТ с микродисперсным и наноалюминием возможно, если напротив окон бомбы Кроуфорда расположить датчики теплового излучения соответствующего диапазона.–

**Выводы.** Одна из причин увеличения скорости горения ТРТ с микродисперсным и наноалюминием может заключаться в агломерации частиц алюминия до размеров полуволновых вибраторов электромагнитного теплового излучения инфракрасного диапазона, вызывающего повышение температуры на величину радиационной составляющей. Этот подход в первом приближении удовлетворительно объясняет удвоение скорости горения. Другие факторы увеличения скорости горения могут быть менее значительными. Для подтверждения вышеизложенного требуется проведение экспериментов.

#### Литература:

1. Лука Л. Т. Де, Гальфетти Л., Северини Ф., Меда Л. и др Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 80 – 93.
2. Osborn I. R., Renie I. P. Temperature and pressure sensitivity of aluminized propellants // AIAA Pap. – 1980. – № 1166. – P. 15.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н.. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энерго-установок. – М.: Физматлит, 2011. – 464с.
4. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 239 с.

5. Винницький А. М., Волков В. Т., Волковицький І. Г., Холодилов С. В. Конструкція і обробка РДТТ – М.: Машиностроение, 1980. – 230 с.
6. Сарнер С. Хімія ракетних топлив : пер. с англ. – М. : Мир, 1969. – 488 с.
7. Михеев М. А., Михеева І. М. Основи теплопередачі. – М.: Энергія, 1977. – 344 с.
8. Присняков В. Ф. Динамічні характеристики ракетних двигателів на твердому паливі: навчальний посібник. – Дніпропетровськ, 1979. – 114 с.
9. Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Архипов В. А., Евсеєнко І. А. Влияние спектрального состава излучения на характеристики зажигания гетерогенных конденсированных систем // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 2. ([www.researchgate.net/publication/266146962](http://www.researchgate.net/publication/266146962).)
10. Геккер І. Р. Взаємодія сильних електромагнітних хвиль з плазмою. – М.: Атомиздат, 1978. – 312 с.

**Козін В. С.**

**Про можливу причину двократного збільшення швидкості горіння суміші ракетного палива з наноалюмінієм**

**АНОТАЦІЯ**

*Метою цієї роботи є виявлення ролі променистого теплообміну при збільшенні швидкості горіння палива з мікродисперсними розмірами часток алюмінію у порівнянні з відомими результатами випробувань. Проведено розрахунок оцінок і порівняння з відомими результатами експериментів. Встановлено відповідність характеристик змін швидкості горіння твердого ракетного палива з нанодисперсним алюмінієм від зміни променистого теплообміну при горінні перхлорату амонію від радіаційної температури. Сучасною тенденцією при створенні твердих ракетних палив є використання мікродисперсного алюмінію в їх складі. У визначених умовах це робить можливим інтенсифікувати променистий теплообмін в камері згорання і підвищити швидкість горіння, покращити тягу і підвищити питомий імпульс. Завдяки тому, що потужність джерел електромагнітної енергії підсумовується, збільшення площі поверхні кількості часток палаючого алюмінію може впливати на швидкість горіння через механізм променистого теплообміну. Розсіювання і поглинання теплового випромінювання визначають частки алюмінію в діапазоні інфрачервоного випромінювання. Те, що випромінювання з такою довжиною хвилі здатне проходити через середовище продуктів згорання в каналі заряду РДТТ підтверджується. При цьому, палаючі частки алюмінію можливо розглядати як напівхвильові вібратори електромагнітного теплового випромінювання. Розміри напівхвильових вібраторів є результатом агломерації. Одна з причин збільшення швидкості горіння ТРП з мікродисперсним і наноалюмінієм може полягати в агломерації частинок алюмінію до розмірів напівхвильових вібраторів електромагнітного теплового випромінювання інфрачервоного діапазону, що викликає підвищення температури на величину радіаційної складової. Для підтвердження вищевикладеного потрібне проведення експериментів.*

**Ключові слова:** променистий теплообмін, швидкість горіння, ракетне паливо, наноалюміній.

**Kozin V. S.**

**About the possible reason for doubling the speed of combustion of mixture from rocket fuel and nano-aluminum**

SUMMARY

*The aim of the search is parts clearing up of radiants heat transfers in burning rates increasing of solid propellant with mikrosized aluminium grains in a comparison with known tests results. Calculations of estimates and comparison with named experimental results is made. An accordance between characteristics of solid propellants burnings rates with nanosized aluminium grains from radiants heat transfers changing by ammonium perchlorates burnings from radiation temperature there established. A modern tendency in solid propellants creation is the use of aluminium micrograins in its composition. In definite conditions it is possible to intensify a radiant heat transfer in combustion chamber of solid-propellant rocket engine and to increase a fuels burning rate, to improve a thrust and specific impulse increases. Due to the fact that power of electromagnetic sources is summing up, increasing summary grains of firing aluminium surface area can have influence on burning rate across a mechanism of radiant heat transfer. Dispersion and absorption of heat radiation is defined by aluminium grains in a range of infrared radiation. The fact that radiation with such a wavelength is able to pass through the environment of combustion products in the solid propellant charge channel is confirmed. In this case firing aluminium grains can be considered as half-waves antennas of electromagnetic heat radiation. Half-waves antennas dimensions are obtained as a result of confluences. One of the reasons for the increase in the burning rate of solid-propellant with microdispersed and nanoaluminum can be the agglomeration of aluminum particles to the size of half-wave electromagnetic radiation emitters of the infrared range, which causes an increase in temperature by the amount of the radiation component. Experiments are required to confirm the above.*

**Key words:** *radiant heat transfer, combustion rate, rocket fuel, nano-aluminum.*