

УДК 544.452

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ

S. Gallier, M. Plaud

Компания ArianeGroup, Вер-ле-Пети 91710, Франция  
stany.gallier@ariane.group, mathieu.plaud@ariane.group

Изучалось влияние ориентации частиц окислителя на скорость горения гетерогенных твердых топлив на основе перхлората аммония. Мезомасштабное численное моделирование проводилось для частиц окислителя, имеющих форму эллипсоида и различную ориентацию относительно поверхности горения. Установлено, что угол ориентации частиц существенно влияет на скорость горения топлива. Скорость горения может меняться на  $5 \div 10$  % в зависимости от аспектного отношения частиц и их содержания в топливе. Частицы, расположенные по нормали к поверхности горения, горят быстрее частиц, расположенных параллельно поверхности горения. Такое сильное влияние ориентации частиц на скорость горения может помочь объяснить хорошо известный, наблюдаемый в твердотопливных двигателях эффект «горба».

Ключевые слова: гетерогенные топлива, скорость горения, эффект «горба» (на зависимости давления от времени), перхлорат аммония.

DOI 10.15372/FGV20210607

### ВВЕДЕНИЕ

Перхлорат аммония (ПХА), часто использующийся в сочетании с полибутадиеновым каучуком с концевыми гидроксильными группами (НТРВ), является распространенным энергетическим материалом для твердотопливных ракетных двигателей. Моделирование процесса горения твердых топлив и предсказание их скорости горения имеет важнейшее значение для практики и развивается уже несколько десятилетий (см. обзор в работе [1]). В начале 2000-х годов появились новые мезомасштабные модели, позволяющие проводить трехмерное моделирование процесса горения с явным описанием гетерогенной микроструктуры топлива [2, 3]. Благодаря подобным моделям можно не только рассчитывать стационарную скорость горения, но и изучать другие аспекты процесса горения, такие как влияние микроструктуры топлива на скорость горения (например, эффект «горба»). «Горб» (на кривой зависимости давления от времени) представляет собой отклонение давления в твердотопливном ракетном двигателе от предсказанного, причем более высокие значения обычно наблюдаются в средней части свода горения, поэтому такое поведение называют также аномалией середины

свода горения. Разница может достигать 6 % [4]. И хотя ясно, что это связано с более высокими скоростями горения топлива в средней части двигателя, достаточно хорошего понимания механизма такого поведения, пока еще нет. Впервые этот эффект был обнаружен в начале 1980-х годов и быстро связан с пространственной вариацией локальной скорости горения, обусловленной пространственной неоднородностью топлива, которая возникает при литье топлива в результате реологических процессов в потоке топливной суспензии [5, 6]. В работе [7] высказано предположение, что пространственная вариация скорости горения может быть обусловлена изменением локальной доли частиц ПХА при литье (из-за их миграции под действием сдвиговых напряжений). С другой стороны, в работе [8] выдвинуто предположение, что эффект «горба» может быть связан с ориентацией частиц ПХА, поскольку крупные частицы ПХА обычно имеют форму сфероида, а не шара. Согласно этой гипотезе, при литье топлива возникает преимущественное направление, вдоль которого выравниваются частицы ПХА, так как они стремятся направить свою главную ось в ту сторону, в которую двигается топливная масса. Недавно в работе [9] на примере типичного образца топлива ПХА/НТРВ с помощью рентгеновской микротомографии обнаружена неслучайная ориента-

ция частиц ПХА, что подтверждает предположение, высказанное в работе [8]. Проведенное в [10] двумерное численное моделирование процесса горения подтвердило, что скорость горения может зависеть от ориентации частиц, которые моделировались как эллипсы. Аналогичный результат получен в [11] при использовании трехмерной модели, в которой частицы ПХА моделировались как вытянутые эллипсоиды. В этой же работе было показано, что эллипсоиды, ориентированные по нормали к поверхности горения, горят быстрее, чем ориентированные параллельно поверхности, что тоже свидетельствует в пользу механизма, основанного на ориентации частиц.

Целью данной работы является дальнейшее изучение роли ориентации частиц ПХА путем прямого мезомасштабного моделирования топлив ПХА/НТРВ. Частицы окислителя моделировались в виде вытянутых сфероидов и располагались под различными углами относительно поверхности горения. Для того чтобы определить наиболее важные параметры, а также выяснить, может ли эффект ориентации быть значительным в случае твердых топлив, используемых на практике, было проведено параметрическое исследование, в ходе которого варьировались состав топлива и давление.

## 1. МЕЗОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ

Численный метод, используемый в данной работе, опубликован в работах [11–13], поэтому здесь мы его опишем кратко. Идея состоит в том, чтобы создать трехмерную модель, учитывающую физические процессы, происходящие на среднем масштабе (обычно порядка  $1 \text{ мкм}^3$ ) как в твердой, так и в газовой фазе. В частности, детали микроструктуры топлива и связанная с ними физика описываются в модели явно.

### 1.1. Численная модель

В нашей модели твердое топливо считается инертным, поэтому в конденсированной фазе необходимо было рассчитывать (с помощью уравнения теплопроводности) только температуру  $T$ :

$$\rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_p \nabla T). \quad (1)$$

Из-за гетерогенности топлива используемые в уравнении (1) значения плотности  $\rho_p$ , удель-

ной теплоемкости  $c_p$  и теплопроводности  $\lambda_p$  варьируются в пространстве (индекс  $p$  означает, что параметр относится к конденсированной фазе). Для описания процессов в газовой фазе (соответствующие параметры отмечены индексом  $g$ ) использовались классическая модификация уравнений Навье — Стокса в приближении малых чисел Маха и уравнение состояния идеального газа, а также предполагалось, что число Льюиса равно единице:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_g} + \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot (\mu_g \nabla \mathbf{u}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_g c_g} \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T) + \frac{\dot{\omega}_T}{\rho_g c_g}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla Y_k = \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot \left( \frac{\lambda_g}{c_g} \nabla Y_k \right) + \frac{\dot{\omega}_k}{\rho_g} \quad (k = 1, N_{esp}), \quad (5)$$

$$\rho_g = \frac{p_0 W}{RT}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{u}$  — вектор скорости газа,  $p_0$  — начальное термодинамическое давление,  $W$  — молекулярная масса газа,  $Y_k$  — массовая доля частиц  $k$ ,  $\mu_g$  — вязкость газа,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Источниковые члены в уравнениях (4) и (5) ( $\dot{\omega}_k$  и  $\dot{\omega}_T$ ) вычислялись с помощью кинетической схемы BDP, состоящей из трех реакций для четырех компонентов ( $N_{esp} = 4$ ) [11, 12]. Связь конденсированной и газовой фаз обеспечивалась с помощью следующих граничных условий на поверхности горения:

$$[\rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} + r_b)] = 0, \quad (7)$$

$$\left[ \frac{\lambda}{c} \nabla Y_k \cdot \mathbf{n} \right] = \dot{m} [Y_k], \quad (8)$$

$$[\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n}] = -\dot{m} Q_s + \Phi, \quad (9)$$

где квадратные скобки означают изменение величин на границе раздела конденсированной и газовой фаз:  $[\cdot] \equiv (\cdot)_g - (\cdot)_p$ ,  $\mathbf{n}$  — вектор нормали к поверхности,  $\dot{m} = \rho_p r_b$  — массовая скорость топлива,  $r_b$  — линейная скорость горения,  $Q_s$  — теплота разложения,  $\Phi$  — тепловой

поток. Скорость горения рассчитывалась с помощью так называемого закона пиролиза:  $r_b = A_s \exp(-E_s/RT_s)$ , где  $E_s$ ,  $T_s$  — энергия активации и температура поверхности. Теплота разложения  $Q_s$  моделирует сложные реакции, протекающие на поверхности горения. В качестве внешнего источника тепла для воспламенения использовался дополнительный тепловой поток  $\Phi$ . Все данные по газофазной кинетике, а также по кинетике поверхностных реакций (в основном  $A_s$ ,  $E_s$ ,  $Q_s$ ) известны. Их можно найти в наших предыдущих работах [11–13].

Положение границы раздела фаз отслеживалось с помощью нулевого значения специальной функции  $\psi$ , которая удовлетворяет представлению ниже уравнению Гамильтона — Якоби:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + r_b \|\nabla \psi\| = 0. \quad (10)$$

Его решение позволяет найти значение функции  $\psi(\mathbf{x}, t)$  в любом месте сетки. Точное положение границы раздела фаз легко задается условием  $\psi = 0$ , которое определяет геометрическое место точек, где накладываются предыдущие граничные условия. Поэтому специальные способы обработки частично «израсходованных» ячеек не использовались, сложные границы раздела фаз легко обрабатывались на фиксированных декартовых сетках. Более подробное описание численного метода, а также физико-химические и кинетические параметры модели можно найти в работах [11, 12].

В пределах одной фазы использовалась однородная сетка (с шагом в 10 мкм), тогда как на поверхности раздела фаз шаг сетки уменьшался до 0.1 мкм. В боковых направлениях накладывались периодические граничные условия, а в нижней части твердого топлива задавались постоянная температура и нулевая скорость. В верхней части расчетной области (в газовой фазе) использовалось условие адиабатического истечения. Вся расчетная область (и топливо, и газ) изначально находилась при температуре окружающей среды. Затем на поверхность топлива подавался постоянный тепловой поток  $\Phi = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, вследствие чего топливо сначала нагревалось, а затем воспламенялось. После того как процесс горения переходил в самоподдерживающийся режим, тепловой поток убирался. При оценке (осредненной по поверхности) скорости горения фаза зажигания, длившаяся, как правило, 20 ÷ 30 мс, в рассмотрение не принималась.

## 1.2. Микроструктура топлив ПХА/НТРВ

Особенность данной работы заключается в том, что здесь рассматриваются частицы ПХА несферической формы. Из рис. 1 видно, что реальная форма частиц ПХА близка к форме вытянутого сфероида. Значения аспектного отношения  $\beta$ , т. е. отношения большой полуоси к малой, получаемые при прямом наблюдении частиц ПХА размером 200 мкм, обычно лежат в диапазоне 1.3 ÷ 1.4. В работе [14] для частиц ПХА размером 300 мкм получен коэффициент формы, примерно равный 0.87, что эквивалентно  $\beta \approx 1.7$ . Поэтому в данной работе мы предполагаем, что крупные частицы ПХА имеют вытянутую сфероидальную форму, характеризующуюся аспектным отношением  $\beta$ . В качестве среднего диаметра крупных частиц ПХА ( $d$ ) и общего массового содержания ПХА в топливе были выбраны типичные для реальных топлив значения, а именно 200 мкм и 85 % соответственно. Средний диаметр следует понимать как осредненный по объему, т. е. такой сфероид имеет тот же объем, что и сфера диаметром  $d$ . Тогда выражения для малой и большой полуосей вытянутого сфероида принимают вид  $a = \beta^{-1/3}d$ ,  $b = \beta^{2/3}d$ . Вследствие такого определения среднего диаметра все рассматриваемые частицы имеют одинаковый объем (независимо от значения  $\beta$ ).

Изучаемые в данной работе топлива, вообще говоря, должны содержать не только крупные частицы ПХА диаметром 200 мкм, но и мелкие частицы ПХА размером, как правило, 5 ÷ 10 мкм. Однако этот диаметр слишком мал, чтобы наша численная модель могла его правильно разрешить, поскольку шаг сетки со-

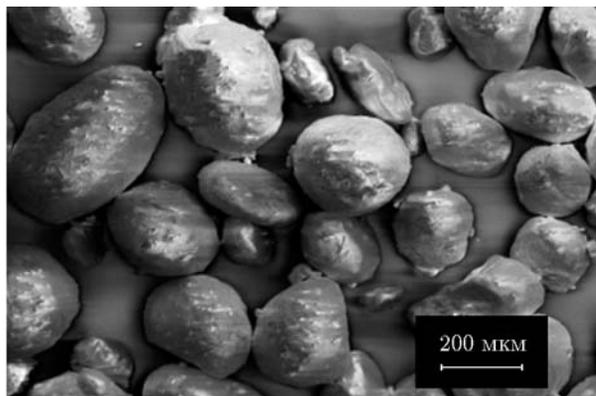


Рис. 1. Микрофотография частиц ПХА (средний диаметр 200 мкм)

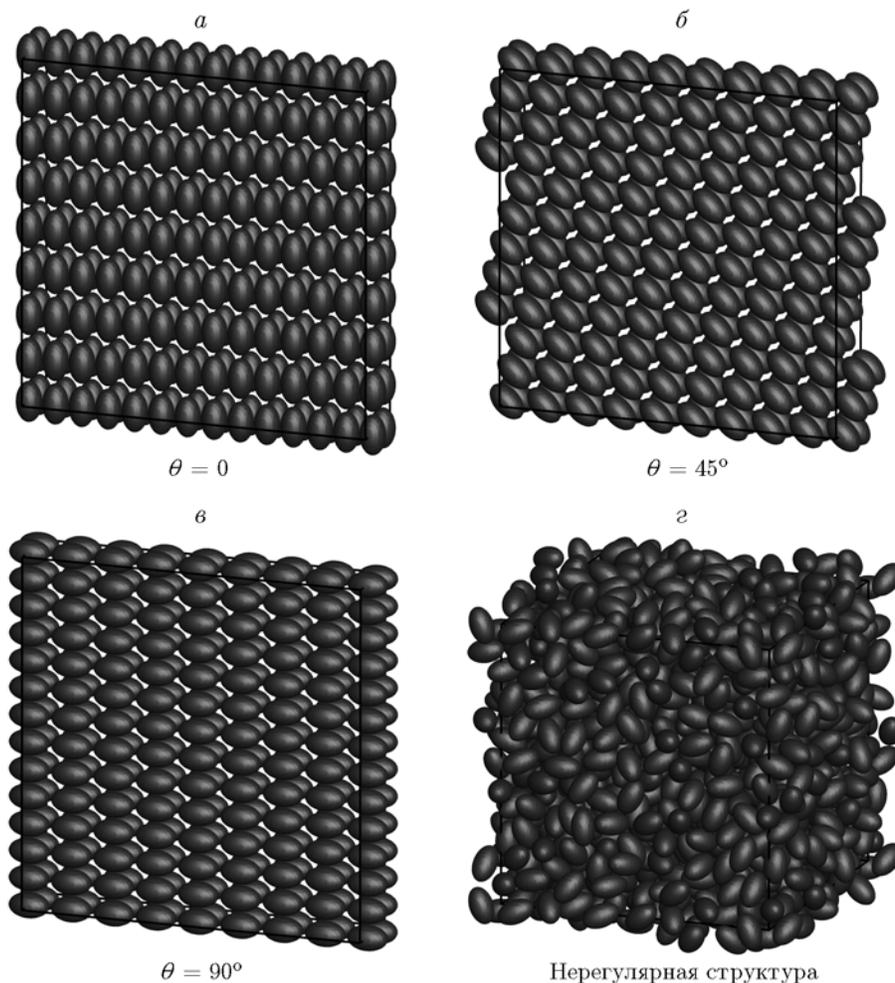


Рис. 2. Некоторые микроструктуры, использованные при моделировании, на примере частиц с  $\beta = 1.6$ :

*a-в* — регулярные структуры с различными углами ориентации, *г* — случайная структура; топливо горит сверху вниз

ставляет 10 мкм. Добавление мелких частиц ПХА в модель потребовало бы вычислительных ресурсов, к которым у авторов нет доступа. Поэтому с помощью метода гомогенизации, описанного в работе [15], мелкие частицы ПХА были объединены вместе со связующим в однородную смесь. Соответственно, явным образом моделировались только крупные частицы ПХА.

Для того чтобы исследовать влияние, которое оказывает угол ориентации частиц  $\theta$ , крупные частицы ПХА размещались в узлах простой кубической решетки, но располагались под углом  $\theta$  относительно нормали к поверхности горения. На рис. 2 показано несколько различных микроструктур на примере частиц с аспектным отношением  $\beta = 1.6$ . Структу-

ры на рис. 2, *a-в* строго упорядочены, а составляющие их частицы ориентированы под углами  $\theta = 0, 45$  и  $90^\circ$ , тогда как структура на рис. 2, *г* является абсолютно случайной. Регулярные микроструктуры инвариантны в направлении оси  $z$ . Следовательно, достаточно всего двух рядов частиц, чтобы задать микроструктуру (а с учетом условия периодичности — фактически всего лишь одного ряда). Таким образом, размер заданной микроструктуры составлял  $10d \times 1d \times 10d$  (очерчен линиями на рис. 2). Для случайной структуры размер заданной области был равен  $10d$  частиц в каждом направлении, а упаковка частиц осуществлялась с помощью алгоритма Монте-Карло [16, 11].

### 1.3. Параметры моделирования

Чтобы оценить влияние состава топлива на эффект, связанный с ориентацией частиц, проведено параметрическое исследование. В качестве базового случая выбрано горение топлива с 85 % ПХА (по массе) и долей крупнодисперсного ПХА относительно общей массы ПХА в топливе  $f = 0.6$  при давлении  $p_0 = 5$  МПа. При таком значении  $f$  масса крупных частиц относится к массе мелких частиц как 51 : 34. Параметры моделирования: общее содержание ПХА в топливе 85 %, доля крупного ПХА  $f = 0.5, 0.6, 0.7$ , аспектное отношение  $\beta = 1, 1.3, 1.6, 1.9$ , давление  $p_0 = 3, 5, 7$  МПа, угол ориентации частиц  $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ . Всего рассмотрено 120 комбинаций. В силу очевидной симметрии угол  $\theta$  варьировался только в диапазоне  $0 \div 90^\circ$ .

Аспектное отношение  $\beta = 1$  соответствует частицам сферической формы, что дает полезный случай для сравнения. Заметим, что доля крупнодисперсного ПХА не превышала 0.7, так как при более высоких значениях  $f$  становится невозможным уместить все частицы в узлах простой кубической структуры. Используемые при моделировании значения аспектного отношения не превышали  $\beta = 2$  (это значение, по-видимому, является верхней границей для реальных частиц ПХА).

Для каждой выбранной комбинации параметров проводилось трехмерное моделирование процесса горения, на основе которого оценивалась средняя скорость горения. Кроме того, проводилось дополнительное моделирование для структуры с абсолютно случайным расположением частиц. В дальнейшем полученные результаты по скорости горения будем представлять относительно соответствующих скоростей для случайных структур. По нашему мнению, это наиболее осмысленный подход, поскольку позволяет сравнить ориентированные микроструктуры со случайной структурой, т. е. с «идеально перемешанным» топливом, что и ожидается при проведении подобного исследования.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Случайные микроструктуры

Прежде чем перейти к рассмотрению влияния, оказываемого ориентацией частиц, мы

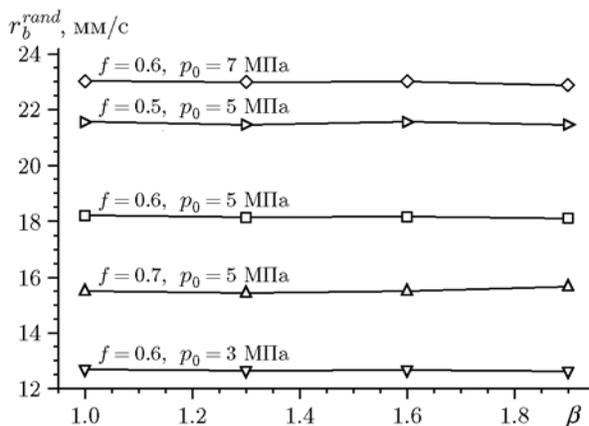


Рис. 3. Зависимость скорости горения топлив со случайно расположенными сфероидальными частицами ПХА от аспектного отношения частиц при разных значениях начального давления и доли крупнодисперсного ПХА

обратились к изучению случайных структур. В частности, было исследовано влияние аспектного отношения частиц  $\beta$  на скорость горения  $r_b^{rand}$  топлив со случайно расположенными сфероидальными частицами ПХА. Полученные скорости горения таких топлив представлены на рис. 3. В расчетах варьировалось аспектное отношение частиц, давление, а также доля крупнодисперсного ПХА. Результаты демонстрируют интересную особенность: если частицы расположены случайным образом, то в широком диапазоне варьируемых параметров скорость горения топлива практически не зависит от формы частиц ПХА (по крайней мере, в рассмотренном диапазоне аспектных отношений). Напоминаем, что все частицы имеют одинаковый объем (независимо от значения  $\beta$ ). При варьировании давления и доли крупнодисперсного ПХА скорость горения изменялась так, как и ожидалось. В частности, она была выше у топлив с низким содержанием крупных частиц ПХА, поскольку в этом случае связующее горит быстрее (из-за обогащения мелкодисперсным ПХА). Представленные на графике значения скорости горения рассчитаны как среднее трех значений, полученных для различных начальных микроструктур со случайным расположением частиц. Различия в скорости горения обычно составляют 0.02 мм/с, такая погрешность слишком мала, чтобы ее можно было увидеть на графике.

Для иллюстрации на рис. 4 приведен «стоп-кадр», полученный при моделировании

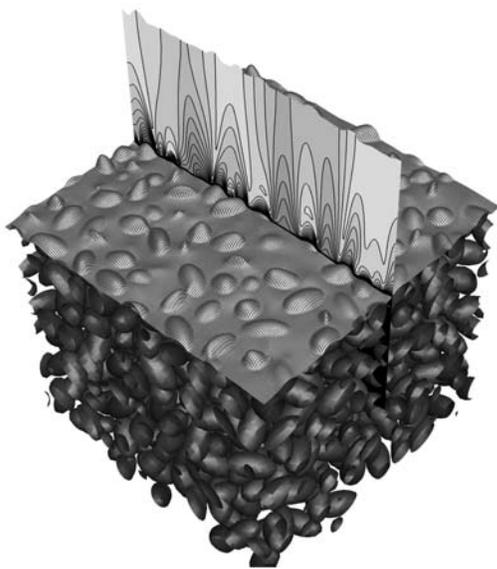


Рис. 4. Упаковка частиц, а также полученные при моделировании поверхность горения и срез температурного распределения в газовой фазе ( $\beta = 1.9$ ,  $p_0 = 5$  МПа,  $f = 0.6$ )

процесса горения случайной структуры с  $\beta = 1.9$  при  $p_0 = 5$  МПа и  $f = 0.6$ , на нем показаны упаковка сфероидальных частиц, поверхность горения (с наложенной расчетной сеткой) и срез температурного распределения в газовой фазе.

## 2.2. Влияние ориентации частиц: базовое топливо

Представленные ниже результаты получены при  $p_0 = 5$  МПа для базового топлива (общее содержание ПХА в топливе 85 %, доля крупнодисперсного ПХА  $f = 0.6$ ). Изменение скорости горения (относительно скорости горения топлив со случайной структурой)  $(r_b - r_b^{rand})/r_b^{rand}$  в зависимости от угла ориентации  $\theta$  при разных значениях  $\beta$  иллюстрирует рис. 5. Результаты свидетельствуют о значительном влиянии угла ориентации  $\theta$  на скорость горения. Самые высокие значения скорости горения наблюдаются в случае сфероидов с вертикальным расположением ( $\theta = 0$ ), тогда как горизонтальное ориентирование сфероидов ( $\theta = 90^\circ$ ) приводит к более низким скоростям горения. При увеличении аспектного отношения этот эффект усиливается, и при  $\beta = 1.9$  изменение скорости горения приближается к 5 % (типичному значению для эффекта «горба» в реальных ракетах). Случай  $\beta = 1$  соответству-

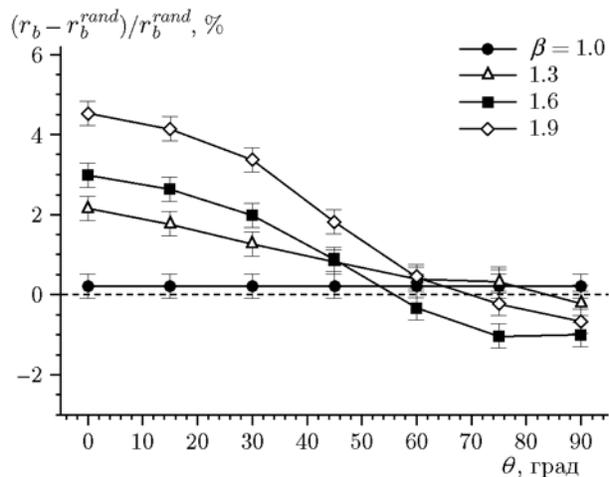


Рис. 5. Относительное изменение скорости горения топлив с регулярной структурой при разных углах ориентации частиц ( $f = 0.6$ ,  $p_0 = 5$  МПа)

ет сферической форме частиц и, очевидно, не должен приводить ни к каким изменениям, так как сферы инвариантны по отношению к вращению. Наблюдаемая погрешность связана со статистическим разбросом скоростей горения, который, как обсуждалось в предыдущем параграфе, возникает при моделировании топлив со случайной структурой.

С физической точки зрения такое поведение скорости горения можно понять, исходя из геометрических соображений. Хорошо известно, что скорость горения системы ПХА/НТРВ сильно зависит от размера частиц ПХА, причем мелкие частицы горят быстрее крупных из-за различий в структуре пламени. Изменение ориентации сфероида приводит к некоторым изменениям на поверхности частицы, что отражается и на поверхности горения. Пересечение сфероида (с малой полуосью  $a$  и аспектным отношением  $\beta$ ), ориентированного под углом  $\theta$ , и плоскости, перпендикулярной его большой оси, дает эллипс с полуосями  $a$  и  $a(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta/\beta)^{1/2}$ . Вторая полуось изменяется от  $a$  (при  $\theta = 0$ , когда это пересечение представляет собой круг) до  $\beta a$  (при  $\theta = 90^\circ$ ). Тогда площадь открытой поверхности частицы ПХА (оцениваемая по сечению, проходящему через центр) равна  $S = \pi a^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta/\beta)^{1/2}$ . Эта площадь достигает наибольшего значения при  $\theta = 90^\circ$ , следовательно, скорость горения должна быть минимальной. И наоборот, угол  $\theta = 0$  дает наименьшую площадь поверхности, сле-

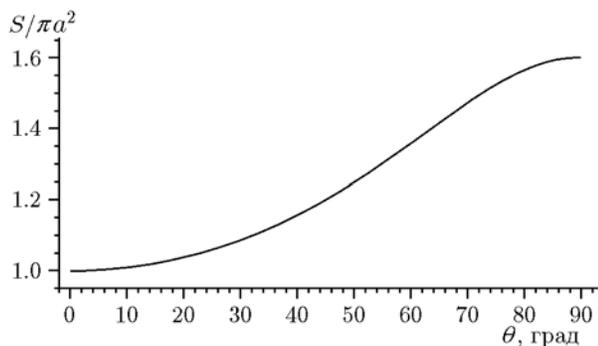


Рис. 6. Нормированная площадь поверхности эллипса, получающегося при сечении сфероида плоскостью под углом  $\theta$  ( $\beta = 1.6$ )

довательно, соответствующие скорости горения должны быть самыми высокими. На рис. 6 представлена зависимость нормированной площади поверхности  $S/\pi a^2 = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \beta)^{1/2}$  от угла  $\theta$  при  $\beta = 1.6$ . Как и ожидалось, форма этой кривой напоминает зависимость скорости горения, представленную на рис. 5, хотя в данном случае зависимость от угла обратная, так как чем больше площадь поверхности частиц, тем ниже скорость горения. Отдельно стоит отметить, что при малых и больших углах площадь поверхности частиц и скорость горения, полученные в результате моделирования, изменяются слабо. Такое сходство означает, что объяснение зависимости скорости горения топлив от угла ориентации крупных частиц ПХА должно быть геометрическим в своей основе.

### 2.3. Влияние доли крупных частиц ПХА

Далее представлены результаты, полученные при отношении массы крупных частиц ПХА (заданных явным образом) к общей массе ПХА в топливе  $f = 0.5, 0.6$  и  $0.7$ . Во всех случаях общая масса ПХА составляет 85 % от полной массы топлива. Оставшийся (мелкодисперсный) ПХА, как было описано ранее, перемешан с НТРВ (связующим). При указанных значениях  $f$  объемная доля крупных частиц составляет 36.4, 43.8 и 51.0 % соответственно. Как уже отмечалось ранее, ни сферы, ни сфероиды невозможно упаковать в простую кубическую структуру так, чтобы их объемная доля значительно превысила 51 %, поскольку теоретический максимум составляет  $\pi/6$ , т. е. примерно 52 %.

Результаты, полученные при  $p_0 = 5$  МПа,

представлены на рис. 7. При относительно небольшом количестве крупных частиц ПХА ( $f = 0.5$ ) скорость горения регулярной структуры мало отличается от скорости горения случайной структуры — можно сказать, что в пределах статистического разброса между ними нет существенных различий. В этом случае связующее содержит большое количество мелких частиц ПХА, вследствие чего их смесь быстро сгорает (практически с такой же скоростью, что и частицы ПХА), поэтому изменение угла ориентации крупных частиц приводит лишь к незначительному изменению общей скорости горения. При увеличении количества крупных частиц ( $f = 0.7$ ) скорость горения становится намного более чувствительной к изменению ориентации частиц: для частиц с  $\beta = 1.6$  и  $1.9$  относительное изменение скорости горения может превышать 10 %. При таких начальных условиях смесь связующего и мелких частиц ПХА горит намного медленнее,

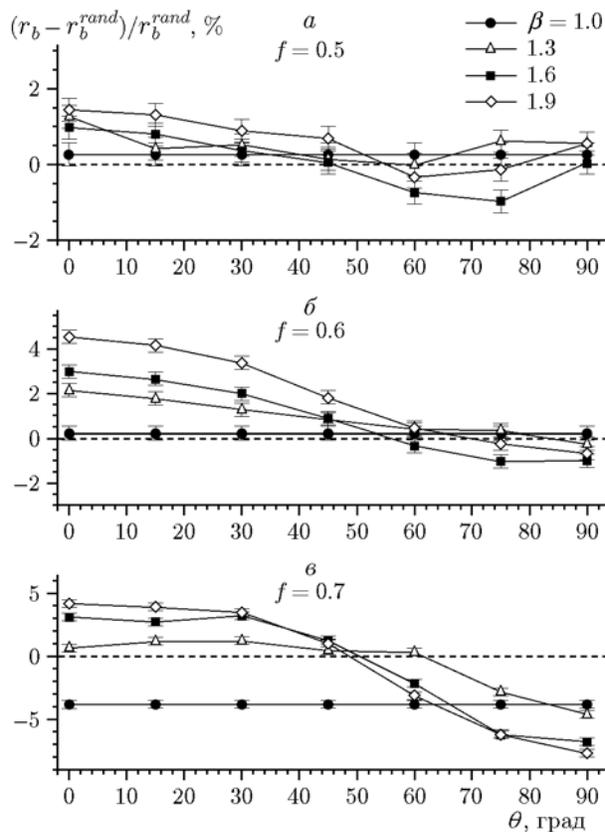


Рис. 7. Относительное изменение скорости горения топлив с регулярной структурой при различных углах ориентации и разном количестве крупных частиц ПХА ( $p_0 = 5$  МПа)

что также объясняет, почему в случае сферических частиц ( $\beta = 1$ ) структура с регулярным их расположением горит медленнее (примерно на 4 %), чем со случайным расположением. В конкретной регулярной структуре чередующиеся слои связующего и ПХА горят последовательно и на сгорание связующего, находящегося между частицами ПХА и имеющего низкую скорость горения, тратится больше времени. Основной вывод из этого заключается в том, что в данной ситуации соотношение между крупной и мелкой фракциями ПХА является важнейшим фактором, поскольку оно контролирует скорость горения смеси связующего и мелких частиц ПХА, заполняющей пространство между крупными частицами. В твердых топливах, встречающихся на практике, соотношение между крупным и мелким ПХА может достигать 0.8, поэтому в реальных топливах данный эффект может проявляться еще сильнее.

#### 2.4. Влияние давления

Влияние давления  $p_0$  на зависимость скорости горения от угла ориентации изучалось на примере топлива с  $f = 0.6$ . Результаты, представленные на рис. 8, показывают, что давление, по всей видимости, оказывает умеренное влияние: в диапазоне  $p_0 = 3 \div 7$  МПа наша модель предсказывает очень похожие зависимости скорости горения от угла ориентации. Максимальные значения относительного изменения скорости горения остаются в пределах  $5 \div 6$  %. Небольшие отличия, которые все-таки заметны на рис. 8, можно объяснить тем, что скорость горения крупных частиц ПХА и скорость горения смеси связующего с мелкими частицами ПХА по-разному реагируют на изменение давления. Регулярная структура со сферическими частицами ( $\beta = 1$ ) при  $p_0 = 3$  МПа горит медленнее, чем случайная структура, а при  $p_0 = 7$  МПа — быстрее, что указывает на то, что давление больше влияет на увеличение скорости горения смеси связующего с мелкими частицами ПХА, чем на крупные частицы ПХА. Это ожидаемый результат, поскольку предполагается, что связующее, смешанное с мелкими частицами ПХА, горит в режиме предварительно перемешанного пламени (следовательно, скорость горения примерно пропорциональна давлению), в то время как горение крупных частиц ПХА частично контроли-

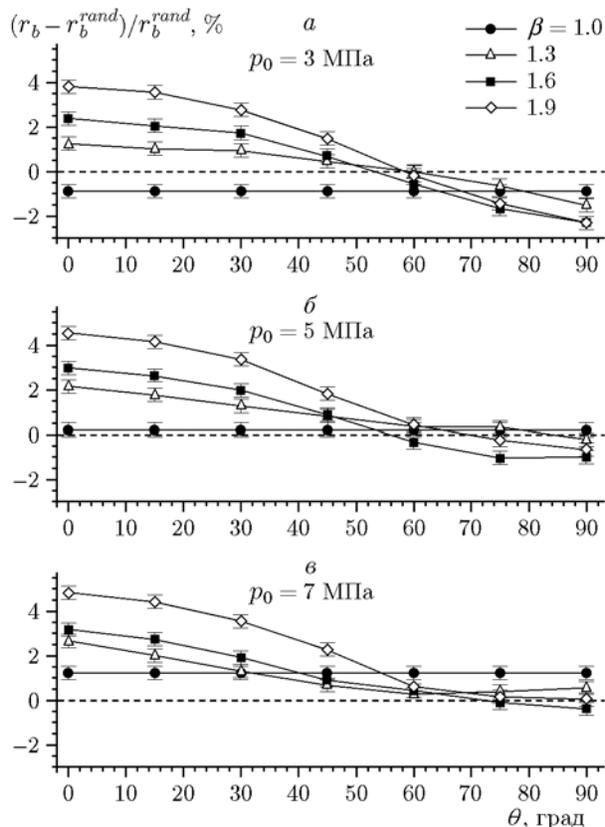


Рис. 8. Относительное изменение скорости горения топлив с регулярной структурой при различных углах ориентации и разных давлениях ( $f = 0.6$ )

руется диффузионным пламенем, которое слабо зависит от давления.

#### ВЫВОДЫ

В данной работе изучалось влияние угла ориентации крупных частиц ПХА на скорость горения гетерогенных твердых топлив. Мезомасштабное численное моделирование проводилось в предположении, что частицы окислителя представляют собой вытянутые сфероиды, размещенные под различными углами в узлах правильной кубической решетки. Когда частицы расположены по нормали к поверхности горения, топливо горит быстрее, чем при расположении частиц параллельно поверхности горения. Это наблюдение предлагает новый взгляд на так называемый эффект «горба» в твердотопливных ракетных двигателях. Вообще, этот эффект может быть значительным: для топлив, используемых на практике, достигает 10 %. Проведенное параметрическое ис-

следование показало, что аспектное отношение частиц и соотношение между фракциями крупных и мелких частиц ПХА являются наиболее важными параметрами, тогда как изменение давления (в исследованном диапазоне) оказывает довольно умеренное воздействие. Чтобы подтвердить сделанные предсказания и укрепить описанный механизм в качестве правдоподобного физического объяснения эффекта «горба», в будущем необходимо провести соответствующие эксперименты по измерению скорости горения.

Работа финансирована Агентством оборонных закупок Франции (DGA).

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Beckstead M. W.** Overview of combustion mechanisms and flame structures for advanced solid propellants // *Prog. Astronaut. Aeronaut.* — 2000. — V. 185. — P. 267–286. — DOI: 10.2514/5.9781600866562.0267.0285.
2. **Jackson T. L., Buckmaster J.** Heterogeneous propellant combustion // *AIAA J.* — 2002. — V. 40, N 6. — P. 1122–1130. — DOI: 10.2514/2.1761.
3. **Massa L., Jackson T. L., Short M.** Numerical solution of three-dimensional heterogeneous solid propellants // *Combust. Theory Model.* — 2003. — V. 7, N 3. — P. 579–602. — DOI: 10.1088/1364-7830/7/3/308.
4. **Deepak D., Jeenu R., Sridharan P., Padmanabhan M. S.** Direct evidence of spatial burning rate variation as cause of midweb anomaly // *J. Propul. Power.* — 2001. — V. 17, N 2. — P. 449–452. — DOI: 10.2514/2.5763.
5. **Kallmeyer T. E., Sayer L. H.** Differences between actual and predicted pressure-time histories of solid rocket motors // 18th AIAA/SAE/ASME Joint Propul. Conf., Cleveland, Ohio, July 21–23, 1982. — AIAA Paper No 1982-1094. — DOI: 10.2514/6.1982-1094.
6. **Friedlander M. P., Jordan F. W.** Radial variation of burning rate in center perforated grains // 20th AIAA/SAE/ASME Joint Propul. Conf., Cincinnati, Ohio, June 11–13, 1984. — AIAA Paper No 1984-1442. — DOI: 10.2514/6.1984-1442.
7. **Le Breton P., Ribéreau D.** Casting process impact on small-scale solid rocket motor ballistic performance // *J. Propul. Power.* — 2002. — V. 18, N 6. — P. 1211–1217. — DOI: 10.2514/2.6055.
8. **Heister S. D.** Ballistics of solid rocket motors with spatial burning rate variations // *J. Propul. Power.* — 1993. — V. 9, N 4. — P. 649–651. — DOI: 10.2514/3.23671.
9. **Kitagawa K., Shimada T., Hasegawa H., Fukunaga M., Miyachi H., Kosuge H.** Correlation of midweb anomaly with microstructure of composite propellant containing high amount of aluminum // 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propul. Conf. and Exhibit, San Diego, California, 31 July–03 Aug, 2011. — AIAA Paper 2011-5714. — DOI: 10.2514/6.2011-5714.
10. **Wang X., Buckmaster J., Jackson T. L.** Burning of ammonium-perchlorate ellipses and spheroids in fuel binder // *J. Propul. Power.* — 2006. — V. 22, N 4. — P. 764–768. — DOI: 10.2514/1.15739.
11. **Plaud M., Gallier S., Morel M.** Simulations of heterogeneous propellant combustion: Effect of particle orientation and shape // *Proc. Combust. Inst.* — 2015. — V. 35, N 2. — P. 2447–2454. — DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.020.
12. **Gallier S., Ferrand A., Plaud M.** Three-dimensional simulations of ignition of composite solid propellants // *Combust. Flame.* — 2016. — V. 173. — P. 2–15. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.07.012.
13. **Gallier S., Plaud M.** A model for solid propellant burning fluctuations using mesoscale simulations // *Acta Astronaut.* — 2019. — V. 158. — P. 296–303. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.029.
14. **Jain S., Mehilal M., Nandagopal S., Singh P. P., Radhakrishnan K. K., Bhattacharya B.** Size and shape of ammonium perchlorate and their influence on properties of composite propellant // *Defence Sci. J.* — 2009. — V. 59, N 3. — P. 294–299. — DOI: 10.14429/dsj.59.1523.
15. **Chen M., Buckmaster J., Jackson T. L., Massa L.** Homogenization issues and the combustion of heterogeneous solid propellants // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29, N 2. — P. 2923–2929. — DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80357-1.
16. **Torquato S.** *Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties.* — Springer, 2013. — V. 16.

*Поступила в редакцию 23.11.2020.  
Принята к публикации 19.02.2021.*