

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПОДВОДА ВОЗДУХА В КАМЕРУ ДОЖИГАНИЯ РАКЕТНО-ПРЯМОТОЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ЧАСТИЦ БОРА

С. А. Рашковский¹, Ю. М. Милёхин², А. В. Федорычев²¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва, rash@ipmnet.ru²Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский

Разработана математическая модель горения частиц бора в ракетно-прямоточном двигателе. Выполнены расчеты полноты сгорания бора в случае одноступенчатого и двухступенчатого подвода воздуха в камеру дожигания. Показано, что двухступенчатый подвод воздуха в ряде случаев позволяет существенно сократить (в $1.5 \div 3$ раза) время полного сгорания частиц бора и тем самым повысить полноту сгорания топлива в ракетно-прямоточном двигателе. Результаты моделирования согласуются с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: ракетно-прямоточный двигатель, частицы бора, горение, полнота сгорания, распределенный подвод воздуха.

DOI 10.15372/FGV20170605

ВВЕДЕНИЕ

В ракетно-прямоточных двигателях на твердом топливе (РПД) сжигание твердого топлива происходит в автономном газогенераторе (ГГ). Продукты сгорания твердого топлива, содержащие большое количество горючих компонентов, поступают из ГГ в камеру дожигания, в которую подается воздух из окружающей среды. В результате в камере образуется горючая смесь, сгорание которой и обеспечивает тягу двигателя.

Максимальный теоретический удельный импульс РПД достигается в том случае, когда основная часть химической энергии, запасенной в твердом топливе, выделяется в камере дожигания. Для этого горючие компоненты твердого топлива должны вести себя в камере сгорания ГГ как инертные, а их полное сгорание должно происходить в камере дожигания РПД в смеси с воздухом. С этой целью ракетное топливо для РПД создается с большим недостатком окислителя, количество которого должно только обеспечивать устойчивое автономное горение твердого топлива в камере сгорания ГГ при наиболее низкой возможной температуре горения в ГГ (обычно менее 2 000 К), в то время как основная доля кислорода, необходимого для полного сжигания горючих компонентов твердого топлива, должна поступать

с воздухом в камеру дожигания, где и выделяется основная часть энергии, идущей на создание тяги двигателя.

Для повышения энергетики РПД в твердое топливо добавляют высокоэнтальпийные компоненты, такие как порошкообразные металлы, а также бор и углерод. Наиболее перспективными являются бор и его соединения, например бориды алюминия и магния [1]. Массовая доля бора в таком твердом топливе может достигать 40 % и более, при этом размеры частиц бора обычно не превышают 10 мкм. Продукты сгорания твердого топлива, поступающие в камеру дожигания РПД, представляют собой двухфазную смесь, содержащую частицы бора и их конгломераты.

В обычных условиях частицы бора покрыты тонким слоем оксида B_2O_3 , который плавится при температуре 723 К. Температура плавления бора $\approx 2\,350$ К. По этой причине частицы бора, поступающие в камеру дожигания РПД, остаются твердыми, но при этом они покрыты тонким слоем жидкого оксида бора.

Обычно выделяют две основные стадии горения частиц бора [1–7]: (i) стадию воспламенения, в течение которой происходит удаление оксидной пленки с поверхности частиц бора за счет химических реакций, (ii) стадию горения частицы бора, свободной от оксидной пленки. Полное время сгорания одиночной частицы бора зависит от многих факторов, основ-

ными из них являются давление, состав и температура газа, в котором горит частица, начальная температура частицы, ее начальный диаметр и начальная толщина оксидной пленки на ее поверхности. В зависимости от этих параметров время полного сгорания одиночной частицы бора может меняться от нескольких десятых долей миллисекунды до сотен миллисекунд. В условиях камеры дожигания, когда происходит горение не одиночной частицы бора, а газозвеси, температура газовой фазы, окружающей частицы, не остается постоянной, а монотонно возрастает с течением времени (если рассматривать частицу смеси, связанную с частицей бора, в лагранжевом описании). При этом существенно (на порядок) снижается время сгорания частиц бора, но всё равно оно может достигать десятков миллисекунд и превышать время пребывания частиц в камере дожигания. В условиях реальных конструкций это приводит к неполному сгоранию частиц и, как следствие, к снижению энергетических характеристик РПД. Чтобы добиться наиболее полной реализации энергетического потенциала двигателя, разработчикам приходится искать технические решения для повышения полноты сгорания топлива.

Эксперименты [8–12] показали, что полнота сгорания бора в одной и той же камере дожигания изменяется от 0.6 до 0.95 в зависимости от организации потоков воздуха и продуктов сгорания твердого топлива на входе в камеру. Одним из способов повышения полноты сгорания бора является оптимизация рецептуры твердого топлива, в частности, уменьшение размеров исходных частиц бора. Несмотря на кажущуюся простоту и очевидность этого способа, он имеет существенные ограничения, связанные с получением ультрадисперсных частиц бора и изготовлением твердого топлива с такими частицами. Однако даже преодолев эти чисто технологические трудности, всё равно не удастся существенно снизить размеры частиц, поступающих в камеру дожигания РПД. Это обусловлено тем, что агломерация частиц бора на поверхности горения твердого топлива [13, 14] приводит к тому, что с поверхности горения вылетают не одиночные частицы бора, а их конгломераты, состоящие из множества связанных между собой исходных частиц бора. В работах [8, 9] показано, что, разделяя поток продуктов сгорания твердого топлива, вытекающих из ГГ, на отдельные струи

и направляя их определенным образом относительно друг друга, можно существенно (до 20 %) повысить полноту сгорания топлива в РПД. Хотя в [8, 9] не дано объяснения этому эффекту, можно предположить, что он связан с дроблением конгломератов частиц бора, образовавшихся на поверхности горения твердого топлива. При дроблении конгломератов образуются более мелкие конгломераты или даже отдельные исходные частицы бора. Естественным пределом такого дробления конгломератов будут исходные частицы бора, размеры которых и определяют максимально достижимое таким методом повышение полноты сгорания топлива в РПД.

Еще один конструктивный способ управления полнотой сгорания твердого топлива в РПД связан с сильной зависимостью времени сгорания частиц бора от температуры и состава окисляющего газа [1–7]: с повышением температуры газа время сгорания одиночной частицы бора существенно уменьшается, главным образом за счет сокращения задержки воспламенения частицы.

В РПД на входе в камеру дожигания происходит смешение продуктов сгорания твердого топлива, поступающих из ГГ, и воздуха, подаваемого через воздухозаборник. Массовое отношение воздух/продукты сгорания твердого топлива для РПД $\alpha_{mix} = 10 \div 20$. Обычно температура поступающего воздуха существенно ниже температуры продуктов сгорания твердого топлива в ГГ. В результате температура образующейся смеси оказывается значительно меньше температуры продуктов сгорания твердого топлива и приближается к температуре поступающего воздуха. Это приводит к замедлению всех химических реакций, в том числе воспламенения и горения частиц бора и их конгломератов, что в условиях камеры дожигания ограниченной длины ведет к неполному сгоранию топлива. В большей степени низкая температура газовой смеси влияет на время задержки воспламенения частиц бора и в меньшей степени на вторую стадию их горения [15]. Это связано с тем, что после воспламенения горячая частица бора выделяет тепла больше, чем ей требуется для самостоятельного горения, что делает вторую стадию горения, в том числе и ее длительность, малочувствительной к температуре окружающего газа. Если удастся быстро воспламенить частицу бора, то дальнейшее ее горение происходит практи-

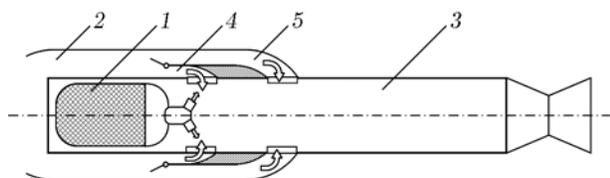


Рис. 1. Схема РПД с распределенным (двухступенчатым) подводом воздуха в камеру дожигаания:

1 — газогенератор на твердом топливе, 2 — воздухозаборник, 3 — камера дожигаания, 4 — первый вход из воздухозаборника в камеру дожигаания, 5 — второй вход из воздухозаборника в камеру дожигаания

чески независимо от температуры окружающего газа при условии, что в нем достаточно окисляющих компонентов (в первую очередь, кислорода).

В работах [8–12] описан способ повышения полноты сгорания твердого топлива в РПД за счет распределенного (ступенчатого) подвода воздуха в камеру дожигаания (рис. 1), при котором в зону камеры дожигаания, примыкающую к выходу из ГГ, подается только часть ζ ($0 < \zeta \leq 1$) общего количества воздуха, необходимого для работы РПД. Этот воздух, смешиваясь с продуктами сгорания твердого топлива, поступающими из ГГ, незначительно снижает температуру образующейся смеси, что способствует быстрому воспламенению частиц бора, движущихся вместе с потоком в камере дожигаания. Воспламенившиеся частицы бора создают достаточно высокую температуру газовой фазы вниз по потоку в камере дожигаания, куда подается оставшаяся порция воздуха, необходимая для полного сгорания частиц бора. Эксперименты [8–12] показали, что такая конструкция РПД позволяет повысить полноту сгорания твердого топлива на 20 ÷ 80 % по сравнению с базовым вариантом, в котором весь воздух сразу подается в зону камеры дожигаания, примыкающую к выходу из ГГ.

Несмотря на то, что экспериментальные данные [8–12], подтверждающие эффективность такого способа повышения полноты сгорания топлива в РПД, получены давно, теоретические работы, количественно обосновывающие этот метод и позволяющие рассчитать оптимальные способы разделения потока воздуха на входе в камеру дожигаания, в литературе отсутствуют.

Основные цели работы: (i) выяснение за-

кономерностей горения газовзвеси частиц бора при распределенном подводе воздуха в камеру дожигаания РПД; (ii) разработка инженерной методики оценки эффективности распределенного подвода воздуха; (iii) определение оптимальных условий распределенного подвода воздуха в камеру дожигаания, при которых достигается наибольшая полнота сгорания частиц бора.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ ДОЖИГАНИЯ

В камере дожигаания РПД происходит горение смеси первичных продуктов сгорания твердого борсодержащего топлива с воздухом. Это газовзвесь частиц бора и их конгломератов. Температура и состав газовой фазы в камере дожигаания существенно влияют на горение частиц бора, которое, в свою очередь, влияет на температуру и состав газа. По этой причине описание процессов в камере дожигаания РПД следует проводить с учетом взаимного влияния газовой фазы и частиц бора.

Полный расчет процессов в камере дожигаания РПД возможен только в рамках трехмерной газодинамической модели, учитывающей турбулентность потока, смешение продуктов сгорания твердого топлива с воздухом, горение частиц бора и химические реакции в газовой фазе.

Вместе с тем для инженерной практики представляют интерес упрощенные модели, позволяющие быстро оценить эффект тех или иных технических решений и определить область параметров, в которых этот эффект будет максимальным.

В настоящей работе рассмотрена упрощенная лагранжева модель горения газовзвеси частиц бора в камере дожигаания РПД, учитывающая распределенный подвод воздуха.

Основные допущения модели:

1) рассматривается изобарическая лагранжева частица топливовоздушной смеси, все параметры которой являются функцией только времени; время эквивалентно пространственной координате (по оси камеры дожигаания), если умножить его на скорость потока в камере дожигаания;

2) топливовоздушная смесь представляет собой газовзвесь, состоящую из газовой фазы, содержащей окисляющие компоненты, и несгоревших частиц бора;

3) все частицы бора в газозвеси в каждый момент времени имеют одинаковый диаметр d_p (монодисперсная газозвесь);

4) воспламенение и горение частиц бора описываются PSU-моделью [1, 5], учитывающей температуру окружающей частицу газовой фазы и содержание в ней окисляющих компонентов; краткое описание PSU-модели (аббревиатура — Pennsylvania State University) дано в приложении;

5) топливовоздушная смесь в целом является термодинамически неравновесной: температуры газовой фазы и частиц бора в общем случае отличаются; с этой точки зрения в камере дожигаания реализуется неравновесный процесс;

6) газовая фаза в каждый момент времени является термодинамически равновесной (в отличие от смеси в целом), т. е. считается, что химические реакции в газовой фазе протекают с бесконечно большой скоростью и параметры газовой фазы равны их термодинамическим значениям, соответствующим мгновенному составу газовой фазы.

Последнее допущение означает, что температуру газовой фазы в каждый момент времени можно рассчитать термодинамически, если известен ее химический состав.

Чтобы в термодинамическом расчете учесть неполное сгорание частиц бора, поступим следующим образом. Пусть массовая доля бора в продуктах сгорания твердого топлива равна z_B . Остальные продукты сгорания топлива считаются газообразными. Тогда массовая доля газа в продуктах сгорания твердого топлива составит $1 - z_B$.

За счет горения частиц бора продукты сгорания твердого топлива в смеси с воздухом будут содержать соединения бора (B_2O_3 , BN, B_4C и др.). Несгоревший бор присутствует в топливовоздушной смеси в виде частиц. Пусть к данному моменту времени в лагранжевой частице смеси сгорела только часть $\eta_B \leq 1$ бора, поступившего в нее из ГГ. Величину η_B далее будем называть полнотой сгорания бора. Для термодинамического расчета такой системы рассмотрим смесь воздуха и продуктов сгорания твердого топлива, в котором массовая доля бора равна $\eta_B z_B$. Остальной бор, массовая доля которого в топливе $(1 - \eta_B)z_B$, в термодинамических расчетах считается инертным компонентом.

Если массоприход продуктов сгорания

твердого топлива в камеру дожигаания равен G_p , а массоприход воздуха — G_a , массовое отношение продуктов сгорания топлива к воздуху в камере дожигаания (а значит, и в рассматриваемой лагранжевой частице) составит $n = \frac{G_p}{G_a}$. Чтобы определить равновесные термодинамические параметры газовой фазы, в частности ее температуру, нужно задать состав твердого топлива (условную химическую формулу и энтальпию образования), долю прореагировавшего (сгоревшего) бора η_B (бора, присутствующего в газовой фазе в виде различных соединений), давление в камере дожигаания, массовое отношение n , а также удельную энтальпию воздуха на входе в камеру дожигаания ΔH_a , учитывающую температуру воздуха на входе.

Для данного твердого топлива температура термодинамически равновесной газовой фазы будет функцией четырех параметров:

$$T_{\text{терм}} = T_{\text{терм}}(p, n, \Delta H_a, \eta_B). \quad (1)$$

Термодинамические расчеты, выполненные по программе [16], показали, что термодинамическая температура слабо меняется в интересующем нас диапазоне давления $1 \div 20$ атм. По этой причине давлением можно пренебречь и переписать (1) в виде

$$T_{\text{терм}} = T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B). \quad (2)$$

Расчеты показали, что эту зависимость удобно представить следующим образом:

$$T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B) = T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B = 1) \zeta_{\text{нд}}^2(n, \Delta H_a, \eta_B), \quad (3)$$

где $T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B = 1)$ — температура термодинамически равновесной смеси, в которой частицы бора полностью сгорели; $\zeta_{\text{нд}}(n, \Delta H_a, \eta_B)$ — коэффициент потерь удельного импульса, связанный с неполным сгоранием частиц бора, также вычисляемый с помощью программы термодинамических расчетов. Расчеты показали, что величина $\zeta_{\text{нд}}$ слабо зависит от n : отклонение $\zeta_{\text{нд}}$ от среднего значения в диапазоне $n = 0.02 \div 0.2$ (при фиксированных ΔH_a и η_B) обычно не превышает 1 %. Поэтому зависимостью от n можно пренебречь:

$$\zeta_{\text{нд}} = \zeta_{\text{нд}}(\Delta H_a, \eta_B). \quad (4)$$

Термодинамические расчеты, выполненные для нескольких составов борсодержащих твердых топлив, показали, что зависимости $T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B = 1)$ и $\zeta_{\text{нд}}(\Delta H_a, \eta_B)$ с достаточной для практики точностью (коэффициент корреляции 0.98) могут быть аппроксимированы функциями

$$T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B = 1) = 293 \frac{a_2 n^2 + a_1 n + a_0}{1 + n}, \quad (5)$$

$$\zeta_{\text{нд}}(\Delta H_a, \eta_B) = b_2 \eta_B^2 + b_1 \eta_B + b_0, \quad (6)$$

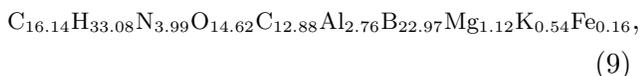
где

$$a_i = a_{i2}(\Delta H_a)^2 + a_{i1} \Delta H_a + a_{i0}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (7)$$

$$b_i = b_{i2}(\Delta H_a)^2 + b_{i1} \Delta H_a + b_{i0}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (8)$$

a_{ij} и b_{ij} — постоянные, зависящие только от состава твердого топлива.

В качестве примера рассмотрим топливо, имеющее условную формулу



энтальпия образования которого равна -403.7 ккал/кг. Для этого топлива получено

$$a_{20} = -125; \quad a_{21} = 0; \quad a_{22} = 0;$$

$$a_{10} = 73.7; \quad a_{11} = -0.037; \quad a_{12} = 0;$$

$$a_{00} = 1.539; \quad a_{01} = 0.0115; \quad a_{02} = 0;$$

$$b_{20} = -0.0738; \quad b_{21} = 2.9 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{22} = -3.85 \cdot 10^{-7};$$

$$b_{10} = 0.271; \quad b_{11} = -8 \cdot 10^{-4}; \quad b_{12} = 9.7 \cdot 10^{-7};$$

$$b_{00} = 0.803; \quad b_{01} = 5.1 \cdot 10^{-4}; \quad b_{02} = -5.8 \cdot 10^{-7}.$$

Так как в рассматриваемой модели считается, что все частицы бора одинакового диаметра d_p , полнота его сгорания вычисляется по формуле

$$\eta_B = 1 - (d_p/d_{p0})^3, \quad (10)$$

где d_{p0} — начальный диаметр частицы бора.

Зависимость удельной энтальпии воздуха от температуры может быть аппроксимирована полиномом

$$\Delta H_a(T_a) = 2.3 \cdot 10^{-5} T_a^2 + 0.2369 T_a - 6.0375 \text{ ккал/кг}, \quad (11)$$

где T_a — температура воздуха на входе в камеру дожигания, К.

Соотношения (3), (5)–(8), (10), (11) позволяют, зная текущий радиус частиц бора, в каждый момент времени рассчитать термодинамически равновесную температуру газовой фазы $T_g = T_{\text{терм}}(n, \Delta H_a, \eta_B)$, которая входит в PSU-модель горения частиц бора [1, 5].

При горении бора вместе с температурой газовой фазы изменяется и ее состав, в частности, содержание окисляющих компонентов. В расширенной PSU-модели учитываются реакции бора с кислородом, водяным паром, фтором и HF [1–7]. Рассматриваемый метод применим для расчета процесса в камере дожигания РПД с учетом всех этих реакций. Однако в данной работе в качестве иллюстрации рассмотрим случай, когда в топливовоздушной смеси имеется только один окисляющий компонент — кислород.

Молярная доля молекулярного кислорода в газовой фазе топливовоздушной смеси $X_{\text{O}_2, \text{mix}}$ с учетом доли сгоревшего к данному моменту бора (10) также может быть рассчитана термодинамически. В результате для каждого момента времени может быть получена зависимость, аналогичная (1):

$$X_{\text{O}_2, \text{mix}} = X_{\text{O}_2, \text{mix}}(p, n, \Delta H_a, \eta_B) \quad (12)$$

или с учетом слабой зависимости от давления

$$X_{\text{O}_2, \text{mix}} = X_{\text{O}_2, \text{mix}}(n, \Delta H_a, \eta_B). \quad (13)$$

Зависимость (12) в рамках рассматриваемой приближенной модели можно также получить в явном виде, если принять, что кислород в газовой фазе топливовоздушной смеси расходуется только на окисление бора. При этом считается, что продукты сгорания твердого топлива не содержат свободного кислорода, так как топливо обеднено окислителем и весь имеющийся в нем кислород соединяется с горючими компонентами уже в камере сгорания ГГ. В этом случае при условии, что кислород поступает в топливовоздушную смесь только с воздухом, начальная молярная доля кислорода в смеси будет определяться соотношением

$$X_{O_2, mix0} = \frac{X_{O_2, a} G_a / \mu_a}{(1 - z_B) G_p / \mu_p + G_a / \mu_a} \quad (14)$$

или

$$X_{O_2, mix0} = \frac{X_{O_2, a} \alpha_{mix}}{(1 - z_B) \mu_a / \mu_{pg} + \alpha_{mix}}, \quad (15)$$

где

$$\alpha_{mix} = 1/n \quad (16)$$

— массовое отношение воздух/продукты сгорания твердого топлива в топливовоздушной смеси, μ_{pg} и μ_a — молярные массы газообразных продуктов сгорания твердого топлива и воздуха, $X_{O_2, a}$ — молярная доля молекулярного кислорода в поступившем воздухе.

В дальнейшем за счет горения бора молярная доля кислорода уменьшится: на каждый моль сгоревшего бора будет расходоваться $4/3$ моля молекулярного кислорода. Если масса сгоревшего бора равна ΔM_B , то на это будет потрачено $\Delta N_{O_2} = \frac{4}{3} \frac{\Delta M_B}{\mu_B}$ молей молекулярного кислорода и при этом образуется $\Delta N_{B_2O_3} = 2\Delta M_B / \mu_B$ молей газообразного B_2O_3 . В зависимости от условий горения образующийся B_2O_3 будет вносить разный вклад в общий молярный баланс газовой фазы. При температуре газовой фазы выше температуры кипения B_2O_3 ($T_{m, B_2O_3} = 2523$ К) моли $\Delta N_{B_2O_3}$ войдут в состав газовой фазы и увеличат ее молярное содержание; в противном случае B_2O_3 будет конденсироваться и тем самым его вклад в молярный баланс газовой фазы будет нулевым.

В общем случае для молярной доли молекулярного кислорода в газовой фазе можно записать

$$X_{O_2, mix} = \frac{N_{O_2}}{N_{O_2} + N_f}, \quad (17)$$

где N_{O_2} и N_f — количество молей молекулярного кислорода и других газообразных компонентов газовой фазы в заданном объеме.

Будем считать, что в процессе горения остальные компоненты газовой фазы не участвуют в реакции, так как представляют собой равновесные продукты, образовавшиеся ранее.

В этом случае для молярной доли свободного кислорода в произвольный момент времени очевидно соотношение

$$X_{O_2, mix} =$$

$$= \frac{N_{O_2}^0 - \Delta N_{O_2}}{N_{O_2}^0 - \Delta N_{O_2} + N_f + \chi(T_g) \Delta N_{B_2O_3}}, \quad (18)$$

где $N_{O_2}^0$ — начальное количество молей молекулярного кислорода в газовой фазе топливовоздушной смеси (сразу после смешения, до начала горения частиц бора); $\chi(T_g) = 0$, если $T_g < T_{m, B_2O_3}$, и $\chi(T_g) = 1$, если $T_g \geq T_{m, B_2O_3}$. Соответственно начальная молярная доля кислорода в газовой фазе топливовоздушной смеси записывается в виде

$$X_{O_2, mix0} = \frac{N_{O_2}^0}{N_{O_2}^0 + N_f}.$$

Отсюда

$$N_f = N_{O_2}^0 \frac{1 - X_{O_2, mix0}}{X_{O_2, mix0}}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18), после простых преобразований получаем

$$X_{O_2, mix} = [(N_{O_2}^0 - \Delta N_{O_2}) X_{O_2, mix0}] / [N_{O_2}^0 - X_{O_2, mix0} \Delta N_{O_2} + \chi(T_g) \Delta N_{B_2O_3} X_{O_2, mix0}], \quad (20)$$

где $N_{O_2}^0 = X_{O_2, a} \frac{M_a}{\mu_a}$ — начальное количество молей кислорода в топливовоздушной смеси, поступившее с воздухом, M_a — масса поступившего воздуха. Тогда соотношение (20) принимает вид

$$X_{O_2, mix} = X_{O_2, mix0} \left[X_{O_2, a} \frac{M_a}{\mu_a} - \frac{4}{3} \frac{\Delta M_B}{\mu_B} \right] / \left[X_{O_2, a} \frac{M_a}{\mu_a} - X_{O_2, mix0} \frac{4}{3} \frac{\Delta M_B}{\mu_B} + \chi(T_g) 2 \frac{\Delta M_B}{\mu_B} X_{O_2, mix0} \right], \quad (21)$$

где

$$\Delta M_B = \eta_B M_B = \eta_B z_B M_p \quad (22)$$

— масса сгоревшего бора, M_p — масса продуктов сгорания твердого топлива в топливовоздушной смеси. Подставляя (22) в (21) и учитывая (16), запишем

$$X_{O_2, mix} = X_{O_2, mix0} \left[\alpha_{mix} \frac{\mu_B}{\mu_a} X_{O_2, a} - \frac{4}{3} \eta_B z_B \right] /$$

$$\left/ \left\{ \alpha_{mix} \frac{\mu_B}{\mu_a} X_{O_2, a} - 2 \left[\frac{2}{3} - \chi(T_g) \right] \eta_B z_B X_{O_2, mix0} \right\} \right. \quad (23)$$

После подстановки (15) в (23) получаем зависимость

$$X_{O_2, mix} = \left[\alpha_{mix} \frac{\mu_B}{\mu_a} X_{O_2, a} - \frac{4}{3} \eta_B z_B \right] \left/ \left\{ \frac{\mu_B}{\mu_a} \left[\frac{(1 - z_B) \mu_a}{\mu_{pg}} + \alpha_{mix} \right] - 2 \left[\frac{2}{3} - \chi(T_g) \right] \eta_B z_B \right\} \right., \quad (24)$$

которая позволяет рассчитывать молярную долю свободного кислорода в газовой фазе топливовоздушной смеси, образованной смешением воздуха и первичных продуктов сгорания твердого топлива в пропорции α_{mix} , и в которой массовая доля сгоревшего к данному моменту бора равна η_B . Отметим, что формула (24) применима к топливовоздушной смеси независимо от предыстории процесса, т. е. от того, когда и в каких пропорциях происходило смешение воздуха и продуктов сгорания топлива; важно, какие значения в данный момент имеют параметры α_{mix} и η_B .

Таким образом, расчет процесса горения газозвеси частиц бора в камере дожигания РПД заключается в решении уравнений PSU-модели [1, 5] (см. приложение), описывающих горение одиночной частицы бора, с учетом переменной температуры газовой фазы T_g и изменяющейся молярной доли молекулярного кислорода в газовой фазе $X_{O_2, mix}$, которые описываются соотношениями (3), (5)–(8), (10), (11) и (24).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными варьируемыми параметрами модели являются:

- начальный диаметр частиц бора d_{p0} ;
- начальная толщина оксидной пленки x_{p0} , во всех вариантах расчета составляющая $x_{p0} = 0.02$ мкм [1];
- начальная температура частиц бора T_{p0} ,

принимаемая равной температуре в камере сгорания ГГ;

- давление в камере дожигания p ;
- температура воздуха на входе в камеру дожигания T_a ;
- молярная доля молекулярного кислорода в воздухе на входе в камеру дожигания $X_{O_2, a}$, считающаяся постоянной и равной 0.21;
- массовое отношение воздух / продукты сгорания твердого топлива в топливовоздушной смеси α_{mix} , которое может зависеть от времени за счет дополнительного (распределенного) подвода воздуха в камеру дожигания.

В данной работе во всех вариантах расчетов принято $z_B = 0.3$. В качестве начального момента времени ($t = 0$) принят момент входа частиц бора в камеру дожигания из ГГ, что соответствует моменту образования лагранжевой частицы топливовоздушной смеси.

Основными результатами расчетов являются:

- зависимость диаметра частиц бора от времени $d_p(t)$,
- зависимость толщины оксидной пленки от времени $x_p(t)$,
- зависимость температуры частиц бора от времени $T_p(t)$,
- зависимость температуры газовой фазы от времени $T_g(t)$,
- зависимость молярной доли молекулярного кислорода в газовой фазе от времени $X_{O_2, mix}(t)$,
- длительность первой стадии горения частиц бора τ_1 , определяемая как время, необходимое для полного исчезновения оксидной пленки на поверхности частиц;
- время полного сгорания частиц бора τ_c , завершением которого считается момент, когда диаметр частиц достигает значения, равного 1 % от первоначального диаметра d_{p0} .

Горение частиц бора в газозвеси при одноступенчатом подводе воздуха

В данном случае весь воздух, необходимый для работы РПД, подается в камеру дожигания в зону, примыкающую к выходу из ГГ. Поэтому в этой серии расчетов полагалось, что весь воздух сразу подается в лагранжеву частицу смеси в момент $t = 0$. При смешении продуктов сгорания твердого топлива с воздухом сразу образуется двухфазная смесь с заданным массовым отношением воздух / продукты сгорания

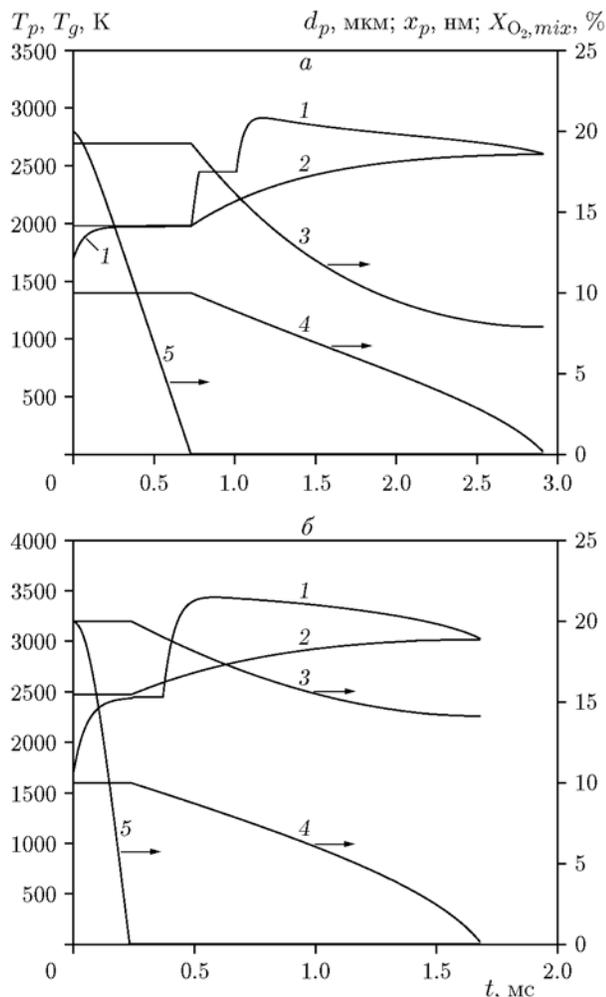


Рис. 2. Зависимости температуры частиц бора (линия 1), температуры газовой фазы лагранжевой частицы (линия 2), молярной доли кислорода в газовой фазе (линия 3), диаметра частиц бора (линия 4) и толщины оксидной пленки (линия 5) от времени в случае одноступенчатого подвода воздуха в камеру дожига РПД:

условия расчетов: $d_{p0} = 10$ мкм, $x_{p0} = 0.02$ мкм, $T_{p0} = 1700$ К, $p = 0.5$ МПа; варианты: а — $T_a = 1700$ К, $\alpha_{mix} = 15$; б — $T_a = 2000$ К, $\alpha_{mix} = 15$

твердого топлива α_{mix} , состоящая из газовой фазы и частиц бора.

После этого начинается расчет процесса горения частиц бора по описанной выше модели.

Характерные результаты расчетов приведены на рис. 2. Видно, что в начальный момент времени температура частиц отличается от равновесной термодинамической температуры топливовоздушной смеси. В результа-

те теплообмена частиц бора с газовой фазой их температуры выравниваются. После этого длительное время частицы бора и газовая фаза находятся в тепловом равновесии, однако при этом идут реакции, приводящие к уменьшению оксида бора на поверхности частиц. После исчезновения оксидной пленки реакция «чистых» частиц бора с кислородом активизируется, температура частиц резко возрастает по сравнению с температурой газовой фазы и тепловое равновесие между ними исчезает. На этом этапе происходит быстрое выгорание частиц бора, что ведет к росту температуры газовой фазы. При достижении частицами бора температуры плавления всё выделившееся тепло расходуется на плавление бора, при этом температура частиц остается неизменной, равной температуре плавления бора. На рис. 2 этому соответствует «палочка» на зависимости температуры частиц бора от времени. После полного плавления бора температура частиц снова растет за счет тепла, выделяющегося при горении. Уменьшение размера частиц приводит к снижению скорости энерговыделения, и в некоторый момент времени температура частицы достигает максимума, после которого она начинает падать за счет теплоотдачи более холодному газу. При этом температура газовой фазы продолжает монотонно расти за счет поступающего в результате горения частиц бора, и за счет теплообмена между частицами бора и газовой фазой. К концу горения частиц бора их температура снова сравнивается с температурой газовой фазы и снова наступает тепловое равновесие.

Расчеты показывают, что при $\alpha_{mix} \leq 5$ молярная доля кислорода в газовой фазе уменьшается практически до нуля за счет горения бора, что приводит к резкому снижению скорости горения и, как следствие, к значительному увеличению времени сгорания частиц бора.

С практической точки зрения представляет интерес зависимость времени сгорания частиц бора от параметра α_{mix} .

На рис. 3 приведены зависимости длительности первой стадии процесса горения τ_1 и времени полного сгорания τ_c частиц бора от массового отношения воздух / продукты сгорания твердого топлива α_{mix} при разных условиях горения в камере дожига. Видно, что зависимость $\tau_c(\alpha_{mix})$ является немонотонной: при некотором отношении α_{mix} она имеет минимальное значение, а любые отклонения от ми-

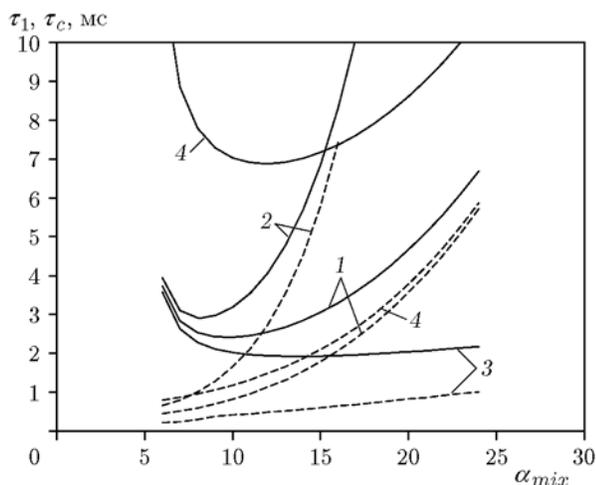


Рис. 3. Зависимости длительности первой стадии процесса горения (штриховые линии) и времени полного сгорания (сплошные линии) частиц бора от массового отношения воздух / продукты сгорания твердого топлива в случае одноступенчатого подвода воздуха в камеру дожига РПД:

условия расчетов: 1 — $d_{p0} = 10$ мкм, $p = 0.5$ МПа, $T_a = 1000$ К, $T_{p0} = 1700$ К; 2 — $d_{p0} = 10$ мкм, $p = 0.5$ МПа, $T_a = 700$ К, $T_{p0} = 1700$ К; 3 — $d_{p0} = 10$ мкм, $p = 0.5$ МПа, $T_a = 1500$ К, $T_{p0} = 1700$ К; 4 — $d_{p0} = 20$ мкм, $p = 0.5$ МПа, $T_a = 1000$ К, $T_{p0} = 1700$ К

нимума приводят к резкому увеличению времени сгорания частиц бора. Во всех вариантах расчета, в которых частицы бора имели размер $d_{p0} = 10$ мкм, этот минимум соответствует диапазону $\alpha_{mix} = 8 \div 10$. С увеличением размера частиц значение α_{mix} , соответствующее минимальному времени сгорания частиц, увеличивается. Например, при $d_{p0} = 20$ мкм оптимально значение $\alpha_{mix} \approx 12$. Очевидно, при оптимальном значении α_{mix} полнота сгорания топлива в условиях одной и той же камеры дожига будет наибольшей.

Следует отметить, что для варианта 4 (см. рис. 3) немонотонность выражена слабее, чем для остальных вариантов. Это указывает на то, что при некоторых сочетаниях параметров немонотонность зависимости $\tau_c(\alpha_{mix})$ может либо исчезать, либо быть слабо выраженной.

Существование минимума на зависимости $\tau_c(\alpha_{mix})$ может быть использовано для регулирования полноты сгорания бора в РПД за счет распределенного подвода воздуха в камеру дожига.

Горение частиц бора в газозвеси при распределенном подводе воздуха

Как следует из приведенных выше результатов моделирования, наиболее значимым параметром, влияющим на длительность горения частиц бора в камере дожига РПД, является температура газовой фазы, в которой происходит горение частиц. Это указывает на возможность регулирования полноты сгорания бора в РПД за счет изменения температуры газовой смеси на входе в камеру дожига.

В самом деле, при смешении первичных продуктов сгорания твердого топлива, вытекающих из ГГ, с воздухом на входе в камеру дожига температура смеси резко падает и становится существенно ниже температуры продуктов сгорания твердого топлива. Скорость горения частиц бора в такой относительно холодной среде мала; это приводит к большому времени сгорания частиц бора и, как следствие, к неполноте его сгорания в камере дожига конечных размеров. Эту проблему можно решить за счет распределенного (например, ступенчатого) подвода воздуха в камеру дожига (см. рис. 1), когда в ближнюю к выходу из ГГ зону камеры подается только часть ζ ($0 < \zeta \leq 1$) общего количества воздуха, которого достаточно для воспламенения и начала горения частиц бора, но при этом оно несильно разбавит горячие продукты сгорания твердого топлива и слабо снизит температуру смеси.

Отметим, что распределенным подводом воздуха можно управлять, изменяя относительное количество воздуха, подаваемого через первый и второй входы (см. рис. 1), и обеспечивая тем самым постоянную высокую полноту сгорания бора в изменяющихся условиях полета (число Маха, высота полета и т. п.).

Рассмотрим модель процесса горения газозвеси частиц бора при распределенном (ступенчатом) подводе воздуха в камеру дожига. Такие условия реализованы в экспериментах [8–12]. Пусть расходы воздуха через первый и второй входы из воздухозаборника в камеру дожига (см. рис. 1) равны G_{a1} и G_{a2} соответственно. Газозвесь, образовавшаяся при смешении продуктов сгорания твердого топлива с первой порцией воздуха G_{a1} , успевает пройти некоторое расстояние Δx_a , прежде чем к ней будет добавлена вторая порция воздуха G_{a2} . На прохождение этого расстояния будет затрачено время $\Delta t_a \sim \Delta x_a / v_g$, где v_g — скорость потока вдоль оси камеры дожига.

В рассматриваемой лагранжевой постановке задачи процесс выглядит следующим образом. В момент времени $t = 0$ происходит мгновенное смешение первичных продуктов сгорания твердого топлива с воздухом в пропорции $\alpha_{mix1} = G_{a1}/G_p$. После этого в образовавшейся смеси начинается горение частиц бора. Через интервал времени Δt_a к этой смеси добавляется новая порция воздуха в пропорции $\alpha_{mix2} = G_{a2}/G_p$, которая также мгновенно смешивается с уже имеющейся смесью. Отношения α_{mix1} и α_{mix2} выбирают таким образом, чтобы обеспечить заданное суммарное массовое отношение $\alpha_{mix\Sigma} = G_a/G_p$ для РПД в целом: $\alpha_{mix\Sigma} = \alpha_{mix1} + \alpha_{mix2}$. Введем коэффициент распределения расхода воздуха ζ ($0 < \zeta \leq 1$):

$$\alpha_{mix1} = \zeta \alpha_{mix\Sigma}, \quad \alpha_{mix2} = (1 - \zeta) \alpha_{mix\Sigma}. \quad (25)$$

В расчетах процесса с распределенным подводом воздуха дополнительно задаются общее массовое отношение $\alpha_{mix\Sigma}$, коэффициент распределения расхода воздуха ζ и время задержки Δt_a между подводом двух порций воздуха в лагранжевую частицу смеси.

Варьируя параметры ζ и Δt_a при заданном отношении $\alpha_{mix\Sigma}$, можно изменять условия горения частиц бора в камере дожигания и тем самым управлять длительностью их горения, а значит, и полнотой сгорания топлива в РПД с камерой дожигания ограниченной длины.

Расчет горения газозвеси частиц бора в камере дожигания с распределенным подводом воздуха проводится по описанной выше модели: в каждый момент времени по формулам (3), (5)–(8), (10), (11), (24) вычисляются текущие значения параметров газовой фазы и одновременно с этим ведется расчет процесса горения частиц бора по PSU-модели [1, 5].

Изменение массового отношения воздух / продукты сгорания твердого топлива в лагранжевой частице топливоздушной смеси для схемы РПД, показанной на рис. 1, определяется по формуле

$$\alpha_{mix}(t) = \begin{cases} \zeta \alpha_{mix\Sigma}, & t < \Delta t_a, \\ \alpha_{mix\Sigma}, & t \geq \Delta t_a. \end{cases} \quad (26)$$

Результаты расчетов показаны на рис. 4.

При проектировании РПД представляет интерес зависимость времени сгорания частиц бора в камере дожигания при распределенном

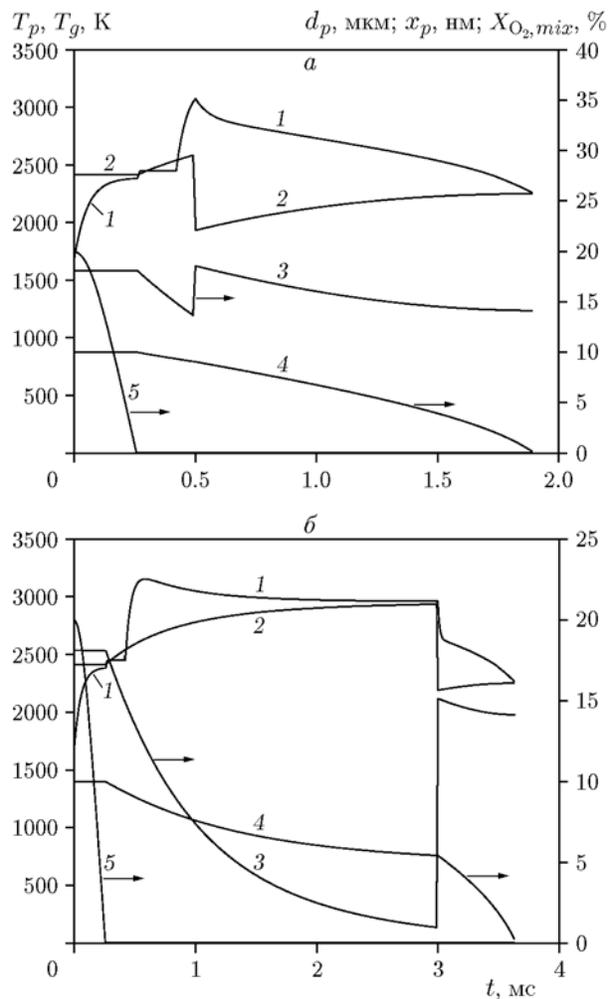


Рис. 4. Зависимости температуры частиц бора (линия 1), температуры газовой фазы лагранжевой частицы (линия 2), молярной доли кислорода в газовой фазе (линия 3), диаметра частиц бора (линия 4) и толщины оксидной пленки (линия 5) от времени при распределенном (двухступенчатом) подводе воздуха в камеру дожигания РПД:

условия расчетов: $d_{p0} = 10$ мкм, $x_{p0} = 0.02$ мкм, $T_{p0} = 1700$ К, $T_a = 1000$ К, $p = 0.5$ МПа, $\alpha_{mix\Sigma} = 15$, $\zeta = 0.3$; варианты: а — $\Delta t_a = 0.5$ мс, б — $\Delta t_a = 3$ мс

подводе воздуха от параметров ζ и Δt_a . Результаты расчетов представлены на рис. 5.

Линия $\zeta = 1$ на рис. 5 соответствует случаю одноступенчатого подвода воздуха в камеру дожигания. Результаты моделирования показывают, что, используя распределенный подвод воздуха в камеру дожигания, можно в $1.5 \div 3$ раза (в зависимости от условий на входе в камеру дожигания) уменьшить время пол-

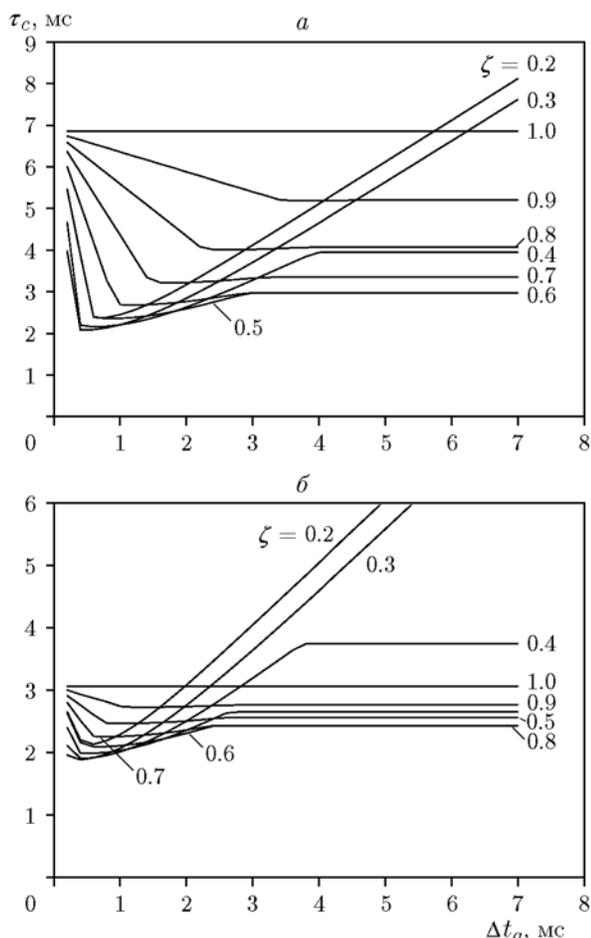


Рис. 5. Зависимость времени полного сгорания частиц бора при распределенном (двухступенчатом) подводе воздуха в камеру дожигания от времени задержки при разных значениях коэффициента распределения расхода:

условия расчетов: $p = 0.5$ МПа, $T_{p0} = 1700$ К, $\alpha_{mix\Sigma} = 15$; варианты: a — $d_{p0} = 10$ мкм, $T_a = 700$ К; b — $d_{p0} = 10$ мкм, $T_a = 1000$ К

ного сгорания частиц бора, а значит, повысить полноту сгорания топлива в РПД. Установлено, что с уменьшением температуры воздуха на входе в камеру дожигания и с уменьшением размеров частиц бора в газозвеси эффективность распределенного подвода воздуха возрастает.

Как следует из рис. 5, оптимальными являются значения коэффициента распределения расхода $\zeta = 0.5 \div 0.6$ при времени задержки $\Delta t_a > 0.5$ мс. В этом случае время сгорания частиц бора слабо зависит от точного значения Δt_a , а значит, чувствительность полноты сго-

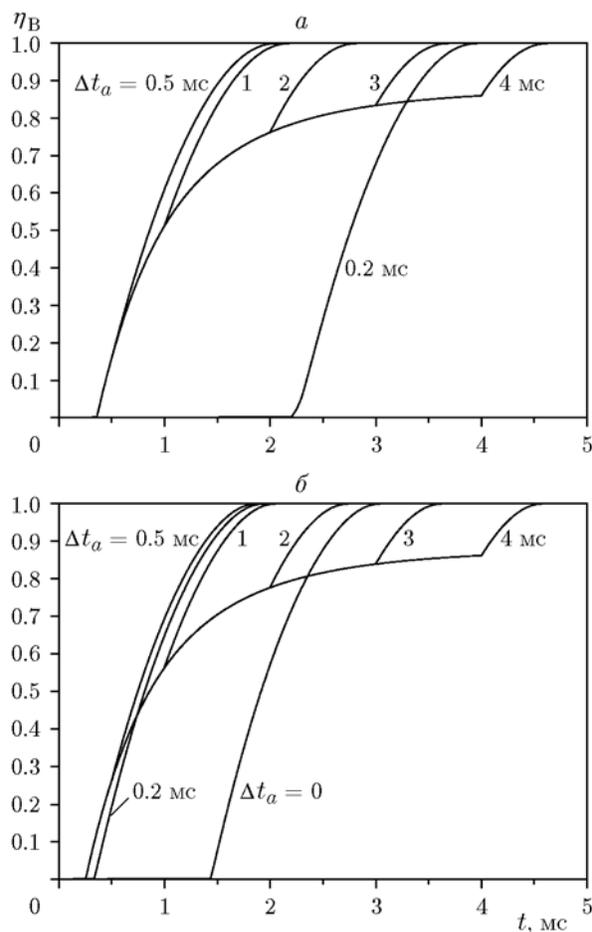


Рис. 6. Зависимость полноты сгорания частиц бора при двухступенчатом подводе воздуха в камеру дожигания от времени пребывания лагранжевой частицы топливовоздушной смеси в камере дожигания при разных временах задержки:

условия расчетов: $p = 0.5$ МПа, $T_{p0} = 1700$ К, $\alpha_{mix\Sigma} = 15$; варианты: a — $d_{p0} = 10$ мкм, $T_a = 700$ К, $\zeta = 0.3$; b — $d_{p0} = 10$ мкм, $T_a = 1000$ К, $\zeta = 0.3$

рания бора к возможным вариациям условий в камере дожигания РПД будет минимальной.

На рис. 6 приведены зависимости полноты сгорания бора (формула (10)) от времени пребывания лагранжевой частицы в камере дожигания при разных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель горения частиц бора в камере дожигания РПД, в том числе с распределенным подводом воздуха в камеру дожигания. Как следует из проведенных расчетов, распределенный подвод воз-

духа эффективен в тех случаях, когда большую часть времени полного сгорания частиц бора (при одноступенчатом подводе воздуха) составляет первая стадия горения. Это имеет место для относительно мелких частиц бора (менее 20 мкм) и относительно низких температур воздуха на входе в камеру дожигания. В этом случае распределенный подвод воздуха позволяет существенно уменьшить длительность первой стадии горения частиц бора и тем самым заметно сократить (в $1.5 \div 3$ раза) время полного сгорания частиц.

Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными [8–12]. К сожалению, в работах [8–12] отсутствует детальная информация по составу твердых топлив, что не позволяет количественно сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными по эффективности распределенного подвода воздуха в камеру дожигания РПД.

В данной работе предполагалось, что все частицы бора имеют одинаковый диаметр. Обобщение предложенной модели на случай произвольного распределения частиц бора по размерам представляется очевидным и не составляет труда. В дальнейшем предполагается учесть присутствие конгломератов частиц бора в первичных продуктах сгорания твердого топлива и особенности воспламенения и горения конгломератов.

Отметим, что конечная скорость газофазных реакций также будет вносить вклад в неполноту сгорания топлива в РПД. Однако полнота сгорания бора будет принципиальным образом влиять на полноту сгорания топлива в целом (т. е. на полноту других химических превращений). Это связано с тем, что бор является самым трудновоспламеняемым компонентом твердого топлива и при неполном сгорании бора температура газа в камере дожигания будет низкой, что приведет к замедлению других химических реакций и, как следствие, к неполноте других химических превращений. Напротив, повышение полноты сгорания бора ведет к росту температуры газовой фазы и интенсификации газофазных химических реакций. Таким образом, бор является своеобразным «фитилем» для всех химических процессов в камере дожигания РПД: от его воспламенения и полноты сгорания зависят интенсивность других химических превращений в камере дожигания и, как следствие, потери удельного им-

пульса РПД.

В данной модели полагалось, что продукты сгорания твердого топлива, поступающие в камеру дожигания РПД из ГГ, содержат только частицы бора. Вместе с тем имеются данные, что частицы бора могут вступать в камере сгорания ГГ в химические реакции с азотом и углеродом, образуя нитрид бора BN и карбид бора B_4C . В этом случае в модель должны быть введены уравнения, описывающие реакцию частиц BN и B_4C с кислородом, при этом основные положения предложенной модели остаются в силе.

Кроме того, следует отметить, что в рассматриваемой модели считается, что смешение воздуха с продуктами сгорания в камере дожигания происходит мгновенно. В действительности этот процесс растянут во времени. Поэтому при сравнении предсказаний модели с экспериментальными данными нужно учитывать время, затраченное на смешение воздуха с продуктами сгорания (в простейшем случае из времени Δt_a можно вычитать время смешения).

Этот вопрос требует специального исследования и может быть достаточно полно решен только в рамках трехмерной газодинамической модели, учитывающей газозафазные химические реакции, турбулентное перемешивание и взаимное влияние газодинамических и тепловых процессов и процесса горения частиц бора.

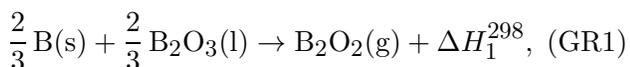
ПРИЛОЖЕНИЕ

В процессе горения частиц бора обычно выделяют две основные стадии [1–7]: (i) стадию воспламенения, в течение которой происходит удаление оксидной пленки с поверхности частиц бора за счет химических реакций, (ii) стадию горения частицы бора, свободной от оксидной пленки. В PSU-модели учитываются реакции бора с молекулярным кислородом, водяным паром, фтористым водородом и атомарным фтором [1–7]. Ниже представлен «урезанный» вариант PSU-модели [6, 7], в котором рассматриваются только реакции с молекулярным кислородом.

Первая стадия. На первой стадии горения после задержки воспламенения оксидный слой находится в жидкой фазе, так как температура плавления оксида бора B_2O_3 равна 723 К. В PSU-модели считается, что оксидный слой состоит из B_2O_3 и полимерного комплекса $(\text{BO})_n$, диффундирующего от границы раздела бор —

оксид бора к границе раздела жидкого оксида бора и газовой фазы, где он вступает в гетерогенную реакцию с газофазными компонентами.

Испарение жидкого оксидного слоя моделируется как химический реакционный процесс, описываемый глобальной реакцией (сохранена нумерация реакций, как в [6, 7]):



рассматриваемой как сумма двух элементарных реакций с общей скоростью реакции

$$R_1 = p_{\text{B}_2\text{O}_2}^0 \left[\frac{1}{\alpha_1 \nu_1} + \frac{1}{D_{\text{B}_2\text{O}_2(g)} \text{Nu} / (2R_u T_p r_p)} \right]^{-1}.$$

Здесь $R_u = 82.06 \text{ см}^3 \cdot \text{атм} / (\text{моль} \cdot \text{К})$; $\Delta H_1^{298} = 72\,400 \text{ кал/моль}$; $p_{\text{B}_2\text{O}_2}^0$ — равновесное давление пара $\text{B}_2\text{O}_2(g)$, определяемое соотношением

$$\ln p_{\text{B}_2\text{O}_2}^0 = 6.609 - \frac{72\,400}{4.575 T_p};$$

α_1 — коэффициент испарения полимера $(\text{BO})_n$, принимаемый постоянным $\alpha_1 = 0.03$; ν_j — столкновительный коэффициент Герца — Кнудсена, для $\text{B}_2\text{O}_2(g)$

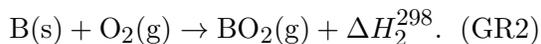
$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{1}{4R_u} \left(\frac{8R'_u}{\pi \mu_{\text{B}_2\text{O}_2}} \right)^{0.5} T_p^{-0.5} = \\ &= 6.06 T_p^{-0.5} \text{ [моль} / (\text{см}^2 \cdot \text{атм} \cdot \text{с})]; \end{aligned}$$

$R'_u = 8.3145 \cdot 10^7 \text{ эрг} / (\text{моль} \cdot \text{К})$; $D_{\text{B}_2\text{O}_2(g)}$ — коэффициент диффузии B_2O_2 в газовой смеси, определяемый соотношением

$$D_{\text{B}_2\text{O}_2(g)} = 1.937 \cdot 10^{-5} p^{-1} T_p^{3/2} \text{ [см}^2/\text{с}];$$

Nu — число Нуссельта; T_p — температура частицы; r_p — радиус частицы бора; x_p — толщина оксидного слоя.

Глобальная реакция для молекулярного кислорода имеет вид



Скорость этой реакции

$$R_j = \frac{X_{\text{BO}}^0}{1 / (\alpha_j \nu_j p_j) + x_p / (D_{\text{BO}, \text{B}_2\text{O}_3} n)},$$

где $j = 2$ — номер реакции (GR2) в PSU-модели; $\Delta H_2^{298} = -68\,000 \text{ кал/моль}$; X_{BO}^0 — равновесная молярная доля $(\text{BO})_n$ на границе раздела $\text{B}(s) - \text{B}_2\text{O}_3(l)$, определяемая соотношением

$$X_{\text{BO}}^0 = \begin{cases} 0 & \text{при } T_p < 1\,650 \text{ К}, \\ 2.32 \cdot 10^{-2} \left[1 - \exp\left(\frac{35\,000}{T_p} - \frac{35\,000}{1\,650}\right) \right] & \\ \text{при } T_p \geq 1\,650 \text{ К}; \end{cases}$$

n — молярная плотность молекул в жидком слое оксида: $n \approx \rho_{\text{B}_2\text{O}_3} / \mu_{\text{B}_2\text{O}_3} = 0.0266 \text{ моль/см}^3$; ρ — плотность; μ — молярная масса; α_j — реакционная вероятность, в частности, $\alpha_2 = 0.035$; $\nu_2 = 7.84 T_p^{-0.5} \text{ моль} / (\text{см}^2 \cdot \text{атм} \cdot \text{с})$; $D_{\text{BO}, \text{B}_2\text{O}_3}$ — коэффициент диффузии молекул $(\text{BO})_n$ в жидком слое $\text{B}_2\text{O}_3(l)$: $D_{\text{BO}, \text{B}_2\text{O}_3} = 5.11 \cdot 10^{-5} \exp(-7\,500/T_p) \text{ [см}^2/\text{с}];$ p_j — парциальное давление окислителя j в окружающем газе.

Уравнения баланса массы для частицы бора и оксидного слоя приводят к следующим уравнениям для радиуса частицы бора и толщины оксидного слоя:

$$\frac{dr_p}{dt} = - \left[\frac{2}{3} R_1 + R_2 \right] \frac{\mu_{\text{B}}}{\rho_{\text{B}}},$$

$$\frac{dx_p}{dt} = - \frac{2}{3} R_1 \frac{\mu_{\text{B}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{B}_2\text{O}_3(l)}}.$$

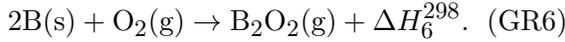
Закон сохранения энергии приводит к уравнению

$$\begin{aligned} \frac{dT_p}{dt} &= 4\pi r_p^2 \left[- \sum_{j=1}^2 R_j \Delta H_j^{298} + \alpha_c (T_\infty - T_p) + \right. \\ &+ \sigma \varepsilon_{\text{B}_2\text{O}_3} (T_\infty^4 - T_p^4) \left. \right] / \left[\frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_{\text{B}} c_{p, \text{B}} + \right. \\ &\left. + 4\pi r_p^2 x_p \rho_{\text{B}_2\text{O}_3} c_{p, \text{B}_2\text{O}_3} \right], \end{aligned}$$

где α_c — коэффициент конвективного теплообмена, c_p — теплоемкость при постоянном давлении. В расчетах принято $c_{p, \text{B}} = 1.026 \text{ Дж} / (\text{г} \cdot \text{К})$, $c_{p, \text{B}_2\text{O}_3} = 0.901 \text{ Дж} / (\text{г} \cdot \text{К})$, $\rho_{\text{B}} = 2.34 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{B}_2\text{O}_3(l)} = 2.460 \text{ г/см}^3$, $\mu_{\text{B}} = 10.806 \text{ г/моль}$, $\mu_{\text{B}_2\text{O}_3} = 69.618 \text{ г/моль}$.

Длительность первой стадии горения частицы бора t_1 определяется как время, необходимое для полного исчезновения оксидного слоя и последующего нагрева частицы до температуры плавления бора, равной 2450 К.

Вторая стадия. Для молекулярного кислорода рассматривается реакция



Тепловой эффект реакции $\Delta H_6^{298} = -102\,000$ кал/моль. Скорость реакции

$$R_6 = k_6 X_{\text{O}_2, \infty} p,$$

где $X_{\text{O}_2, \infty}$ — молярная доля молекулярного кислорода в окружающем газе. Константа скорости реакции [моль/(см² · с · атм)]

$$k_6 = 1.5 \cdot \begin{cases} 1.57 \cdot 10^8 T_p^{-1/2} \exp(-32\,500/T_p), & 1\,600 < T_p \leq 1\,750 \text{ К}; \\ 31.5 T_p^{-1/2} \exp(-5\,630/T_p), & 1\,750 < T_p \leq 2\,450 \text{ К}; \\ 0.0625 \pm 0.0125, & T_p > 2\,450 \text{ К}. \end{cases}$$

Скорость уноса массы с единицы поверхности частицы определяется соотношением

$$\dot{m}_B = \frac{\xi \bar{m}_{\text{O}_2}}{R_{kin, \text{O}_2} + R_{diff, \text{O}_2}},$$

где \bar{m}_{O_2} — массовая доля молекулярного кислорода в окружающем газе; $\xi = 20$; $R_{kin, j}$ и $R_{diff, j}$ — кинетическое и диффузионное «сопротивление» реакции с участием j -го окисляющего компонента, которые определяются соотношениями:

$$R_{kin, j} = \frac{\mu_j}{\mu_{mix} \mu_B k_j'' p}; \quad k_{\text{O}_2}'' = k_{\text{O}_2}',$$

$$k_{\text{H}_2\text{O}}'' = k_{\text{H}_2\text{O}}' \frac{1}{R_u T_p}, \quad k_{\text{HF}}'' = k_{\text{HF}}' \frac{1}{R_u T_p},$$

$$k_{\text{F}}'' = k_{\text{F}}' \frac{1}{R_u T_p}; \quad R_{diff, j} = \frac{r_p}{(\text{F/O})_{st, j} \rho D};$$

$$\mu_{mix} = \left(\sum_j \frac{\bar{m}_j}{\mu_j} \right)^{-1}; \quad \mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ г/моль};$$

$$(\rho D)_{0, \text{O}_2} = 2.23 \cdot 10^{-4} \text{ г/(см} \cdot \text{с)}.$$

Изменение радиуса частицы находится из массового баланса:

$$\frac{dr_p}{dt} = - \frac{\dot{m}_B}{\rho_B}.$$

Плотность частицы бора считается постоянной и равной $\rho_B = 2.34$ г/см³.

Если температура частицы отличается от температуры плавления бора, то уравнение баланса энергии приводит к уравнению для температуры частицы:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{4\pi r_p^2}{(4/3)\pi r_p^3 \rho_B c_{p, B}} [-R_6 \Delta H_6^{298} + \alpha_c (T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon_B (T_\infty^4 - T_p^4)]. \quad (\text{A1})$$

Здесь также принято $\varepsilon_B = 0.84$.

В процессе плавления частицы бора (после того, как была достигнута температура плавления бора) ее температура остается постоянной до тех пор, пока не расплавляется весь бор. Характеристикой этого процесса является доля расплавленного бора f ($0 \leq f \leq 1$), описываемая уравнением

$$\frac{df}{dt} = \frac{4\pi r_p^2}{(4/3)\pi r_p^3 \rho_B \Delta H_{m, B}} \times [-R_6 \Delta H_6^{298} + \alpha_c (T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon_B (T_\infty^4 - T_p^4)],$$

где $\Delta H_{m, B}$ — удельная теплота плавления бора, в расчетах принято $\Delta H_{m, B} = 23.6$ кДж/моль. При достижении $f = 0$ весь бор оказывается расплавленным, и процесс снова описывается уравнением (A1).

Считается, что вторая стадия процесса горения частицы бора начинается с момента достижения частицей температуры плавления бора и длится до тех пор, пока радиус частицы не уменьшится до величины, равной 1 % от первоначального.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kuo K. K., Ragini A.** Applications of Turbulent and Multiphase Combustion. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
2. **Maček A.** Combustion of boron particles: experiment and theory // Fourteenth Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh, PA: The Combustion Inst., 1972. — P. 1401–1411. — (Proc. Combust. Inst.; V. 14).

3. **King M. K.** Ignition and combustion of boron particles and clouds // J. Spacecraft and Rockets. — 1982. — V. 19. — P. 294–306.
4. **Yeh C. L., Kuo K. K.** Theoretical model development and verification of diffusion/reaction mechanisms of boron particle combustion // Proc. 8th Intern. Symp. on Transport Phenomena in Combustion, San Francisco, July 16–20, 1995. — Oxford, UK: Taylor & Francis, 1996. — V. 1. — P. 45–63.
5. **Yeh C., Kuo K.** Ignition and combustion of boron particles // Prog. Energy Combust. Sci. — 1996. — V. 22. — P. 511–541.
6. **Ulas A., Kuo K. K., Gotzmer C.** Ignition and combustion of boron particles in fluorine-containing environments // Combust. Flame. — 2001. — V. 127, N 1–2. — P. 1935–1957.
7. **Hussmann B., Pfitzner M.** Extended combustion model for single boron particles — Part I: Theory // Combust. Flame. — 2010. — V. 157. — P. 803–821.
8. **Vigot C., Bardelle L., Nadaud L.** Improvement of boron combustion in a solid-fuel ramrocket // AIAA/ASME/SAE/ASEE 22nd Joint Propulsion Conf., June 16–18, 1986, Huntsville, Alabama. — P. 1–9.
9. **Vigot C., Cochet A., Guin C.** Combustion behavior of boron-based solid propellants in a ducted rocket // Proc. 2nd Intern. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion «Combustion of Boron-based Solid Propellants and Fuels», Lampoldshausen (FRG), March 4–6, 1991. — P. 1–18.
10. **Kubota N., Kuwahara T.** Combustion of energetic fuel for ducted rockets (I) // Propell., Explos., Pyrotech. — 1991. — V. 16. — P. 51–54.
11. **Kubota N., Miyata K., Kuwahara T., Mitsuno M., Nakagawa I.** Energetic solid fuels for ducted rockets (III) // Propell., Explos., Pyrotech. — 1992. — V. 17. — P. 303–306.
12. **Kubota N.** Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion. — Second, Completely Revised and Extended Edition. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. — P. 439–468.
13. **King M. K.** A review of studies of boron ignition and combustion phenomenon at atlantic research corp. over the past decade // Proc. 2nd Intern. Symp. Special Topics in Chemical Propulsion «Combustion of Boron-based Solid Propellants and Solid Fuels», Lampoldshausen (FRG), March 4–6, 1991.
14. **Laredo D., Gany A.** Combustion phenomena of highly metallized solid propellants // Acta Astronaut. — 1983. — V. 10, N 5–6. — P. 437–441.
15. **Young G., Sullivan K., Zachariah M. R., Yu K.** Combustion characteristics of boron nanoparticles // Combust. Flame. — 2009. — V. 156. — P. 322–333.
16. **Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г.** Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. — М.: Металлургия, 1994.

*Поступила в редакцию 25/XII 2016 г.,
в окончательном варианте — 14/II 2017 г.*