

Численное моделирование стационарных волн горения и детонации в смеси частиц бора с воздухом

Гидаспов В.Ю.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail:gidaspov@mai.ru*

Аннотация

Приводятся результаты численных исследований воспламенения и детонации горючей смеси дисперсных частиц бора с воздухом. Разработана упрощенная физико-математическая модель процесса. Дисперсные частицы считаются двухкомпонентными и состоящими из бора и оксида бора, учитываются процессы плавления и испарения материала, а также поверхностная реакция образования оксида бора. Несущий газ является многокомпонентным, находящимся в состоянии термодинамического равновесия, при этом учитывается наличие в продуктах сгорания мелкодисперсных частиц бора, оксида бора и нитрида бора. Расчетным путем определены структура и минимальная скорость распространения стационарной детонационной волны и максимальная скорость потока при стационарном горении. Показано, что вычисленные в волнах параметры асимптотически стремятся к своим равновесным значениям.

Ключевые слова: численное моделирование, металлизированные топлива, химические реакции, фазовые переходы, горение, детонации.

Введение

В настоящее время большой теоретический и практический интерес представляют задачи образования и распространения волн горения и детонации в многофазных средах, состоящих из горючих частиц металлов и газообразного окислителя. Горение газозвесей металлических частиц сопровождается протеканием поверхностных и газофазных химических превращений, приводящим в частности к образованию конденсированных продуктов на поверхности частицы и в продуктах сгорания. Обзоры результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований горения частиц металлов содержатся в большом количестве статей и монографий [1-12].

В настоящей работе исследуется процесс самовоспламенения, горения и детонации мелкодисперсной взвеси бора в воздухе в канале постоянного сечения. Рассматривается два типа течения: за ударной волной, распространяющейся с постоянной скоростью; после впрыска частиц в высокотемпературный поток. При численном моделировании считается, что бор одновременно участвует в реакциях изменения состава капли (образования оксида бора) и испарения. В газовой фазе происходят химические превращения, приводящие к образованию соединений бора с кислородом и азотом,

количество и фазовый состав которых существенно зависит от соотношения бора и кислорода в горючей смеси. Процесс сгорания заканчивается установлением скоростного, температурного, фазового и химического равновесия.

Физико-математическая модель

При построении физико-математической модели процесса, считается, что течение одномерное; объемная доля частиц в газе мала; эффекты вязкости теплопроводности и диффузии существенны только при взаимодействии частиц с газом; химические реакции протекают в газовой фазе и на поверхности частиц. Дробление и коагуляция частиц не рассматриваются.

Стационарные двухфазные течения, возникающие в канале постоянного сечения за стационарной ударной волной (УВ), распространяющейся по горючей смеси со скоростью D и после впрыска частиц в начальном сечении, при сделанных выше предположениях описываются аналогичной, используемой в [13-17], системой дифференциально-алгебраических уравнений (1)-(3):

$$\begin{aligned}
 \rho v + n_s m_s v_s &= \rho_0 v_0 + n_{s0} m_{s0} v_{s0} \\
 \rho v^2 + p + n_s m_s v_s^2 &= \rho_0 v_0^2 + p_0 + n_{s0} m_{s0} v_{s0}^2 \\
 \rho v \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right) + n_s m_s v_s \left(e_s + \frac{v_s^2}{2} \right) &= \rho_0 v_0 \left(e_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{v_0^2}{2} \right) + n_{s0} m_{s0} v_{s0} \left(e_{s0} + \frac{v_{s0}^2}{2} \right) \\
 n_s v_s &= n_{s0} v_{s0}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{d\rho v \gamma_i + n_s m_s v_s \gamma_{is}}{d\xi} = W_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$v_s \frac{dm_{si}}{d\xi} = \dot{m}_{si} = W_i \mu_i / n_s, \quad i = N_s + 1, \dots, N + N_s$$

$$v_s \frac{du_s}{d\xi} = \dot{u}_s$$

$$v_s \frac{dm_s H_s}{d\xi} = \dot{H}_s$$

$$e = \sum_{i=1}^N \gamma_i e_i, \quad p = \rho R \sum_{i=1}^N \gamma_i T, \quad e_s = \sum_{i=N+1}^{N_s} \gamma_{is} e_{is} \mu_i, \quad m_s = \sum_{i=N+1}^{N_s} m_{si}, \quad m_{si} = m_s \gamma_{is} \mu_i$$

Здесь $\rho, p, e, \gamma_i, \mu_i$ - плотность, давление, внутренняя энергия и мольно-массовые концентрации и молекулярные веса компонент, соответственно; $n_s, m_s, e_s, H_s, \gamma_{is}, m_{si}$ - число частиц в единице объема, масса, внутренняя энергия, энтальпия, число молей i -ого вещества в килограмме массы частицы, масса i -ого вещества в частице, соответственно; $\dot{u}_s, \dot{H}_s, \dot{m}_{si}$ - выражения, описывающие скорость изменения скорости, энтальпии и массы i -ого вещества частицы; W_i - число молей i -ого вещества образующегося в единице объема в единицу времени за счет протекания химических реакций и фазовых переходов. В системе уравнений (1)-(3) в список из N веществ в газовой фазе могут входить конденсированные компоненты. Вещества, входящие в состав дисперсной частицы нумеруются индексами $N+1, \dots, N+N_s$, соответствующие им газофазные и твердые продукты могут также присутствовать в газовой фазе.

При рассмотрении течения за УВ: $\xi = Dt - x$ (расстояние от ударной волны до рассматриваемой точки x, t - время), $v = D - u, v_s = D - u_s$ - скорость газа и частиц относительно УВ, индексом "0" обозначены параметры перед УВ. В

случае впрыска частиц $\xi \equiv x$, $v \equiv u$, $v_s \equiv u_s$, индексом “0” обозначены параметры в сечении впрыска.

Для замыкания системы дифференциально-алгебраических уравнений (1)-(3) используются модели термодинамики, химической кинетики, сопротивления и тепломассообмена капель с газом [13-21].

Необходимо отметить, что для рассматриваемого вида течений выполняются законы сохранения элементного состава, которые могут быть записаны в виде:

$$\sum_{i=1}^N A_i^K \frac{\rho v \gamma_i + n_s m_s v_s \gamma_{is}}{\rho v + n_s m_s v_s} = \gamma_K^0, \quad k = 1, \dots, N_e. \quad (4)$$

Здесь A_i^K - число к-ого элемента в i-ом веществе, N_e - число элементов, γ_K^0 - заданное число молей к-ого элемента в килограмме газокапельной смеси.

Особенности моделирования горения и детонации боросодержащих металлогазовых горючих смесей

Особенностью горения бора по сравнению с магнием и алюминием является то, что температуры плавления и кипения оксида бора ($T_m^{B_2O_3} = 723$ К, $T_b^{B_2O_3} = 1953$ К), образующегося в процессе окисления бора кислородом существенно ниже температур плавления и кипения бора ($T_m^B = 2348$ К, $T_b^B = 3931$ К). Характерные температуры горения бора составляют 2700-3200 К (при детонации 3000-3700 К), при этом пиковые значения достигаются в узкой зоне в окрестности стехиометрии ($(m_B / m_{air})_{CT} = 0.105$). Таким образом, при избытке

окислителя частица может либо полностью испариться либо состоять из жидкого оксида бора, при недостатке окислителя на момент окончания горения частица будет состоять из трудно испаряющегося бора [7-12].

Для моделирования горения бора было разработано несколько моделей. В частности модель адиабатического горения при постоянном давлении. Считается заданным давление смеси, состав двухфазной смеси (отношение массы частиц бора к массе газа (в расчетах кислород или воздух), а также начальная температура, при которой рассчитывается энтальпия двухфазной смеси, которая потом остается неизменной. Считается, что продукты сгорания включают как газофазные, так и конденсированные компоненты (которые моделируются по методике, приведенной [11-17]). При моделировании горения бора в кислороде считается, что продукты сгорания включают 11 компонент BO_2 , B_2O_3 , B_2O , B_2 , BO , B_2O_2 , O_2 , $B_2O_3(т, ж)$, $B(т, ж)$, O , B .

На рисунке 1 приводятся зависимости температуры и массовых концентраций компонент, входящих в состав продуктов сгорания в зависимости от отношения начальных масс кислорода и бора при различных давлениях. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [10] по значениям температуры и массовой концентрации конденсированного бора в продуктах сгорания.

Также было проведено моделирование горения бора в воздухе, состав продуктов сгорания при этом включал 16 компонент BO_2 , B_2O_3 , B_2O , B_2 ,

$BO, BN, B_2O_2, O_2, N_2, NO, B_2O_3(т,ж), B(т,ж), BN(т,ж) O, N, B$. Температура адиабатического горения бора в воздухе существенно ниже чем в кислороде (рис. 1а, 2 г), продукты сгорания могут включать твердый (B^*) и жидкий (B^{**}) бор, а также твердый нитрид бора (BN^*). Необходимо отметить, что при малых значениях отношения массы воздуха к массе бора, наблюдаются аномально высокие значения плотности (рис. 2б), что видимо является физическим ограничением на использование равновесной модели, но в тоже время свидетельствует об эффективности разработанных вычислительных алгоритмов и программ численного моделирования.

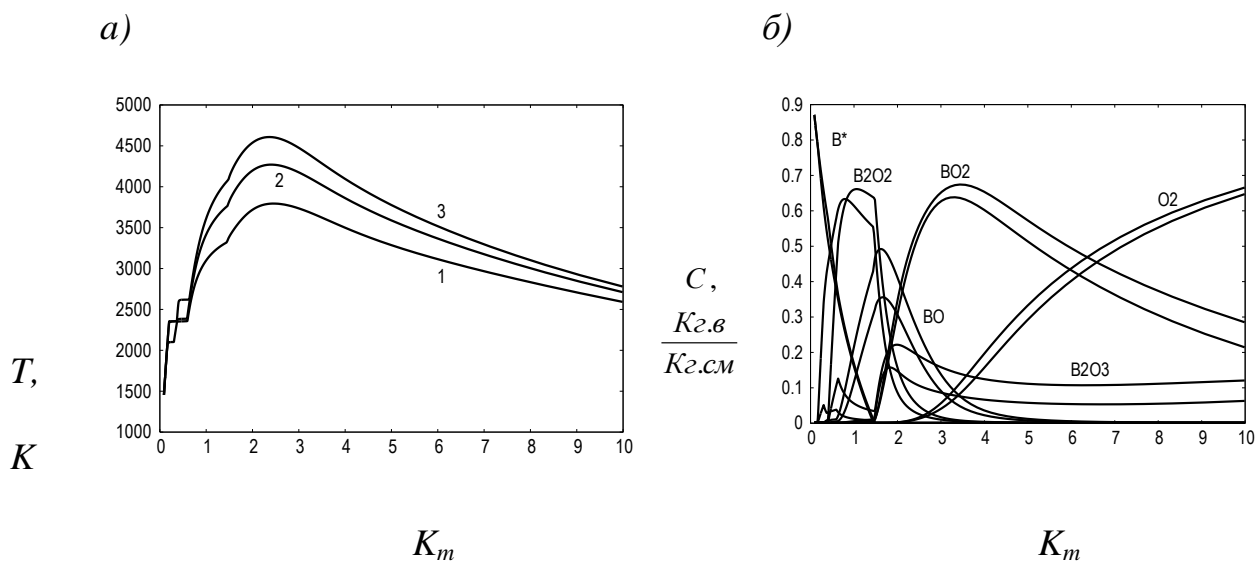


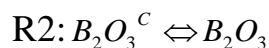
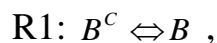
Рис. 1. Зависимость адиабатической температуры горения (а) и массовых долей компонент (б) от отношения массы кислорода к массе бора ($1 - p = 0.1$ МПа, 2- $p = 1$ МПа, 3 - $p=4$ МПа). Стехиометрическое соотношение: $K_m=2.22$

При моделировании неравновесного течения частиц бора в высокотемпературном воздухе считается, что в процессе окисления частица становится многокомпонентной и состоит из бора (B) и оксида бора (B_2O_3). В

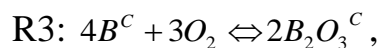
процессе теплого взаимодействия с горячим воздухом частица нагревается и ее температура достигает как температуры плавления оксида бора, так и температуры плавления бора. Считается, что процесс плавления происходит равновесно, соответственно энтальпию частицы можно представить как сумму энтальпий компонент, входящих в её состав [13, 17-19]:

$$H_s(T) = \gamma_{B_2O_3}^s H_{B_2O_3}^s(T) + \gamma_{B_2O_3}^l H_{B_2O_3}^l(T) + \gamma_B^s H_B^s(T) + \gamma_B^l H_B^l(T). \quad (5)$$

Для описания поверхностных реакций используется кинетический механизм, включающий: реакции испарения (конденсации):



и реакции окисления бора:



индекс “с” относится к твердой и жидкой фазам. Скорости реакций R1-R2 в первом приближении можно найти из соотношений вида (6а) [13,17]. Для нахождения скорости реакции R3 можно использовать диффузионную (6а) и кинетическую (6б) модели [13,17]. Считается, что скорость притока кислорода к частице бора прямо пропорциональна объемной концентрации кислорода, площади поверхности капли, занятой бором. Также в экспериментальных работах отмечается, что скорость воспламенения возрастает при увеличении размера частицы. Для описания процесса воспламенения частицы предлагается использовать кинетическую модель, константы K , n , m , E при этом

подбираются из условия совпадения рассчитанных минимальных температур воздуха необходимых для самовоспламенения частиц экспериментальным данным.

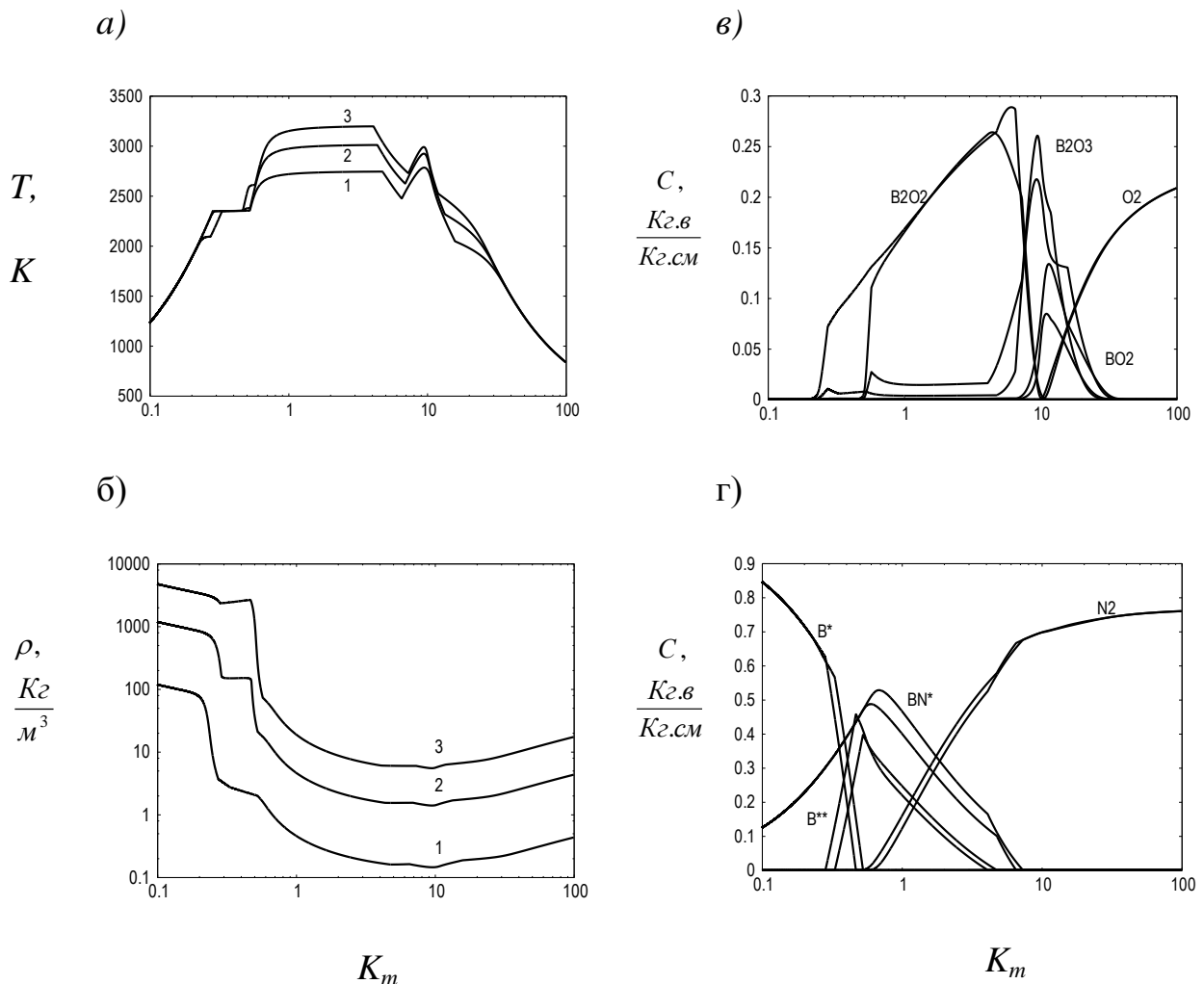


Рис. 2. Зависимость адиабатической температуры горения (а) плотности (б), массовых долей компонент (в, г) от отношения массы воздуха к массе бора ($1 - p = 0.1$ МПа, $2 - p = 1$ МПа, $3 - p = 4$ МПа). Стехиометрическое соотношение:

$$K_m = 9.53$$

$$\dot{m}_{O_2}^{R3} = -2\pi d \frac{m_B \rho_S}{\rho_B m_S} \delta_{mi}^0 D_i \rho \ln \left(\frac{1 - \gamma_{O_2} \mu_{O_2}}{1 - \gamma_{O_2}^S \mu_{O_2}} \right) \quad (6a)$$

$$\dot{m}_{O_2}^{R3} = -\pi d^2 \frac{m_B \rho_S}{\rho_B m_S} \delta_{mi}^0 K \left(\frac{T_S}{T_m^B} \right)^m \left(\frac{d_S}{d_S^0} \right)^n \rho \exp(-E / R_B T_S) (\gamma_{O_2} - \gamma_{O_2}^S), \quad (6б)$$

В расчетах $E = 1$ МДж/кг, $n=1$, $m=2$, $d_s^0=100$ мкм, $K= 198$, R_B - газовая постоянная бора, равновесная концентрация $\gamma_{O_2}^S$ находится из условия химического равновесия [5] для реакции R3. Необходимо отметить, что значения вышеприведенных констант не являются окончательными и нуждаются в дополнительном уточнении с использованием экспериментальных данных. Для определения температуры самовоспламенения частиц бора различного диаметра решаются уравнения (1)-(3) в предположении о малости отношения массы бора к массе воздуха, скорость впрыскиваемых частиц бора считается равной скорости потока воздуха. Расчетным путем получено, что температура самовоспламенения обратно пропорциональна диаметру частицы и прямо пропорциональна давлению воздуха (рис. 3). Характерная зависимость температуры частицы бора от времени представлена на рис. 4. В начале частица медленно нагревается до температуры газа, затем в результате экзотермической реакции окисления бора (R3) температура частицы начинает превышать температуру газа, если затем следует резкий скачек температуры (кривые 1, 3, 5), то воспламенение происходит, если нет (кривые 2, 4, 6) – то считается, что воспламенение не происходит. Особенностью воспламенения бора является двухэтапность процесса. Частица вначале прогревается до температуры газа, затем наступает этап медленного горения частицы с температурой ненамного превышающей температуру газа и затем следует этап догорания с резким повышением температуры частиц (кривая 5, рис. 4). Необходимо отметить, что в рассмотренных вариантах температура частиц ниже температуры плавления

бора. Данный факт требует дополнительного анализа и возможно некоторой корректировки модели.

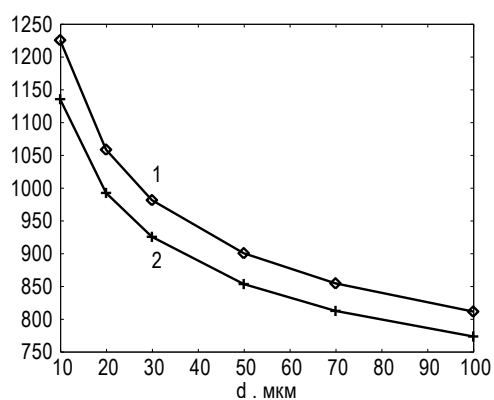


Рис. 3. Зависимость минимальной температуры самовоспламенения частицы бора от начального диаметра (1 – 101325Па, 2 – 202650 Па)

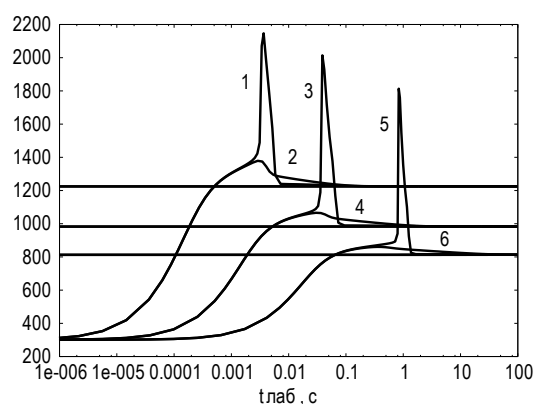


Рис. 4. Зависимость температуры одиночной частицы бора различного диаметра от времени при различных температурах воздуха ($p_0=101325$ Па, $d_s=10$ мкм : 1-1222 К, 2 – 1221 К -; $d_s=30$ мкм : 3-980 К, 4 – 979 К, $d_s=100$ мкм : 5-810 К, 2 – 809 К)

Численное моделирование неравновесного течения частиц бора в высокотемпературном воздухе

Исследуется процесс самовоспламенения, горения и детонации мелкодисперсных взвесей бора в воздухе в канале постоянного сечения в двух постановках: за ударной волной, распространяющейся с постоянной скоростью и после впрыска частиц в высокотемпературный поток. Считается, что материал частиц испаряется и одновременно участвует в реакциях изменения состава капли (образования жидкого оксида бора). В газовой фазе происходят

химические превращения, приводящие к образованию различных соединений, состоящих из элементов, входящих в состав горючего и воздуха, количество и фазовый состав которых существенно зависит от соотношения горючего и окислителя. Процесс сгорания заканчивается установлением скоростного, температурного, фазового и химического равновесия.

С использованием равновесной газофазной модели были рассчитаны равновесная детонационная адиабата и параметры равновесной волны горения, соответствующей максимально возможной скорости потока воздуха. Результаты расчетов приведены на рисунках 5, 6 и 8, 9, соответственно. Необходимо отметить, что в состав продуктов сгорания входят конденсированные компоненты: при избытке окислителя - $B_2O_3^*$; при избытке горючего могут содержаться - B^* , BN^* . В окрестности стехиометрии существует узкая зона, в которой состав продуктов сгорания полностью газофазный (рис. 6, 8).

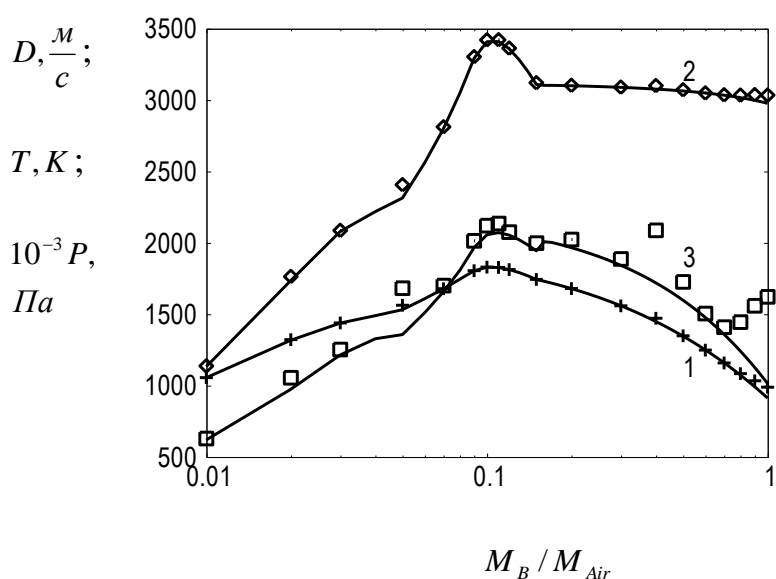


Рис. 5. Зависимость скорости детонации Чепмена-Жуге (1), температуры (2), давления (3) от отношения массы частиц бора к массе воздуха. Сплошная кривая – равновесный расчет, маркеры – неравновесный.

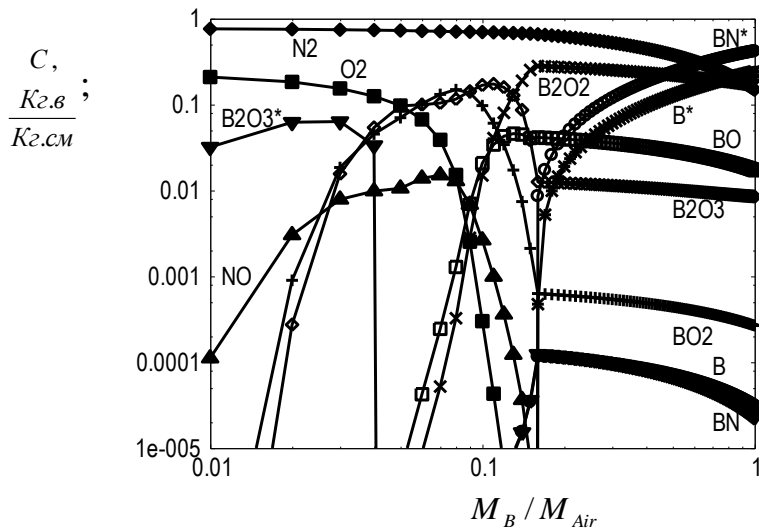


Рис. 6. Зависимость концентраций продуктов сгорания в точке Чепмена-Жуге от отношения массы частиц бора к массе воздуха (равновесный расчет).

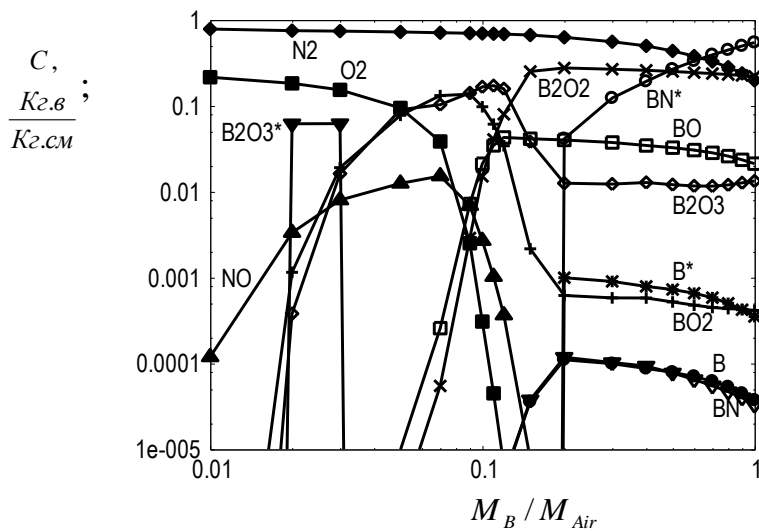


Рис. 7. Зависимость концентраций продуктов сгорания в точке Чепмена-Жуге от отношения массы частиц бора к массе воздуха (двухфазный расчет).

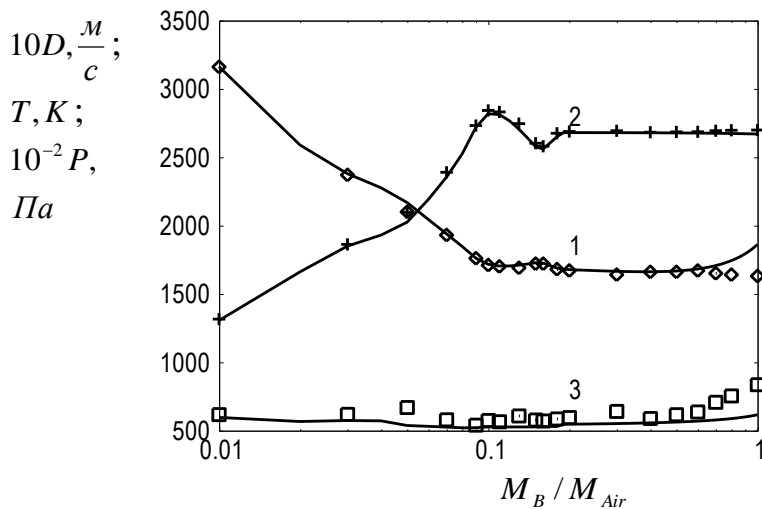


Рис. 8. Зависимость максимальной скорости газа при которой существует стационарная волна горения (1); температуры - (2), давления - (3) от отношения массы частиц бора к массе воздуха ($p_0 = 101325$ Па, $T_0 = 1000$ К). Сплошная кривая – равновесный расчет, маркеры – неравновесный.

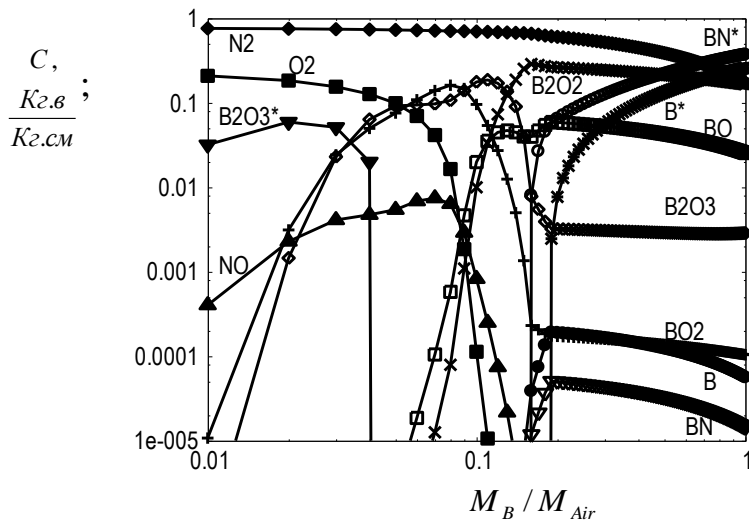


Рис. 9. Зависимость концентраций продуктов сгорания в точке Чепмена-Жуге от отношения массы частиц бора к массе воздуха (равновесный расчет).

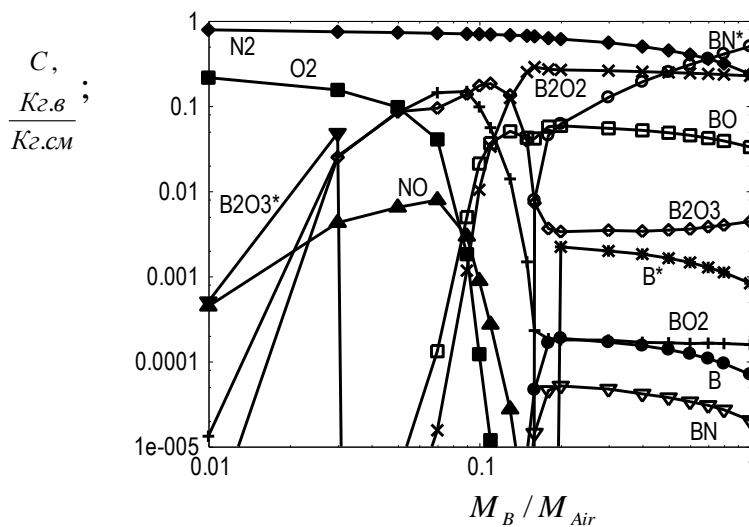


Рис. 10. Зависимость концентраций продуктов сгорания в точке Чепмена-Жуге от отношения массы частиц бора к массе воздуха (двухфазный расчет).

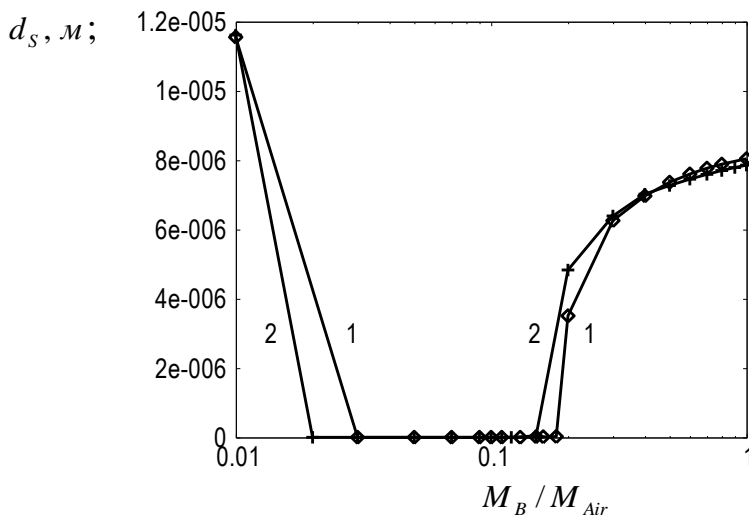


Рис. 11. Зависимость диаметра частиц при завершении физико-химических процессов. 1 – детонация Чепмена-Жуге; 2 – стационарная волна горения

Были проведены расчеты детонации и горения двухфазной смеси, состоящей из частиц бора и воздуха. Были определены скорость детонации Чепмена-Жуге и максимальная скорость потока, при которой существует

стационарная волна горения. Скорость детонации Чепмена-Жуге и температура с высокой точностью совпадает с равновесной (рис. 5). Концентрации дисперсного бора и оксида бора отличаются от равновесных (рис. 7). Это связано с тем, что частицы на момент окончания процесса полностью не испарились (рис. 11).

Также была проведена серия расчетов с целью определения максимальной скорости воздуха при которой существует стационарная волна горения в двухфазной горючей смеси частиц бора с воздухом. Начальная температура воздуха составляла 1000 К, диаметр частиц рассматривался в диапазоне 10-100 мкм, отношение масс частиц и воздуха (m_B / m_{air}) варьировалось от 0.01 до 1. Состав продуктов сгорания считался равновесным, при этом в нем учитывались конденсированные компоненты. Рассчитанная максимальная скорость потока с высокой точностью совпадает с идеальным значением (рис. 8), температуры близки вплоть до $m_B / m_{air} = 0.8$ (рис.8), конечное давление во всем диапазоне параметров отличается от идеального на 5-10%. Частицы полностью испаряются только в узкой зоне при соотношении m_B / m_{air} близком к стехиометрии (рис. 11), при этом при избытке окислителя частица состоит из оксида бора, при избытке горючего – из бора.

Рассмотрим характерные распределения параметров в зависимости от собственного времени ($dt = dx/v_s$) в стационарной волне горения (рис. 12-18). Вначале частица медленно нагревается до температуры газа (рис. 12), давление

при этом падает (рис. 13), затем происходит ускорение процесса с активным образованием оксида бора (рис. 15), далее-замедление процесса нагрева, связанное с конкурированием процессов окисления бора и испарением оксида бора (рис. 12, 15).

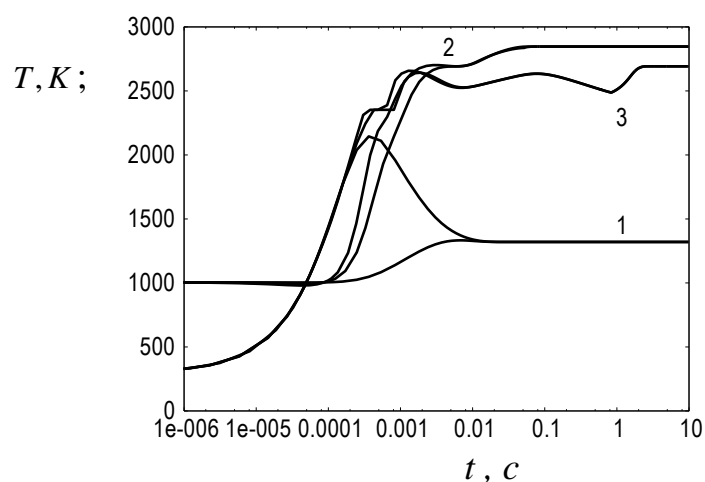


Рис. 12. Зависимость температуры в волне горения от времени. 1 - $M_B / M_{Air} = 0.01$; 2 - 0.1; 3 - 0.2

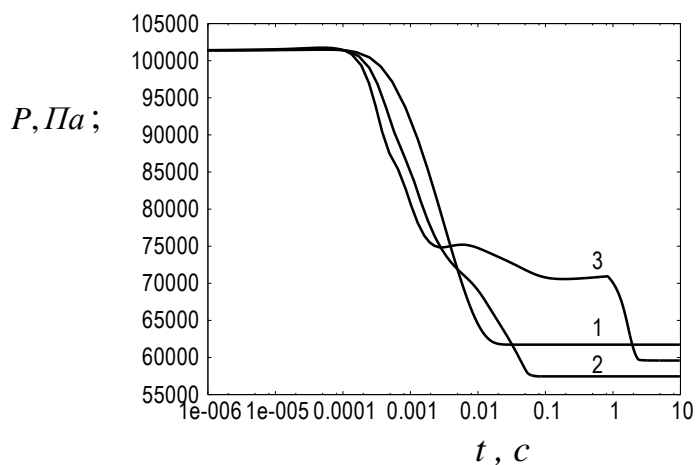


Рис. 13. Зависимость давления в волне горения от времени. 1 - $M_B / M_{Air} = 0.01$; 2 - 0.1; 3 - 0.2

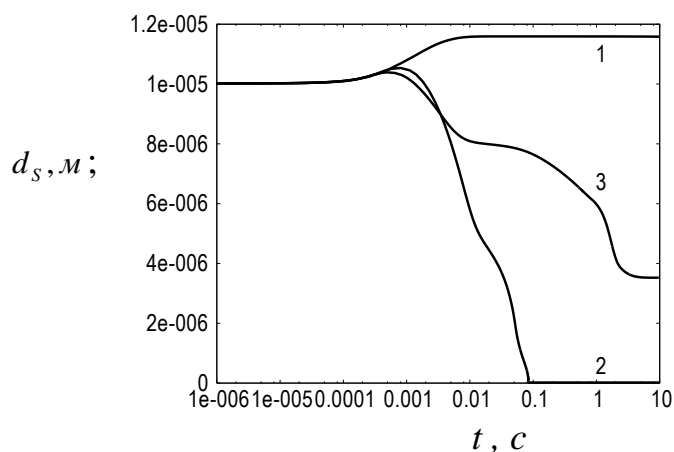


Рис. 14. Зависимость диаметра частицы в волне горения от времени. 1 - $M_B / M_{Air} = 0.01$; 2 - 0.1; 3 - 0.2

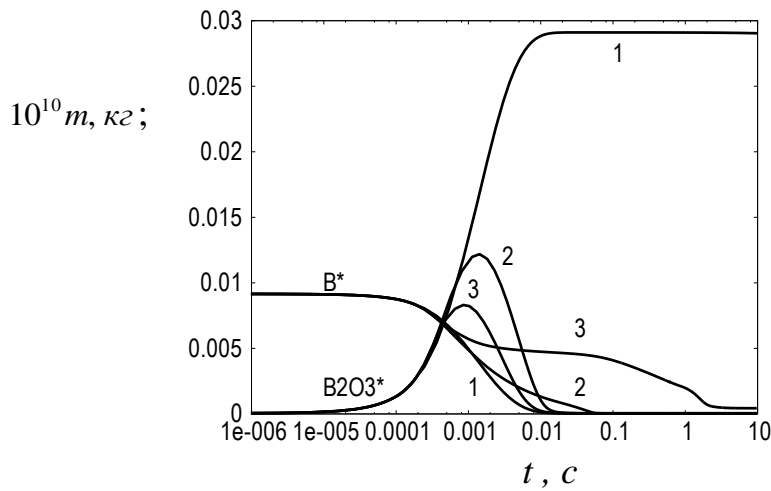


Рис. 15. Зависимость массы бора и оксида бора в частице в волне горения от времени. 1 - $M_B / M_{Air} = 0.01$; 2 - 0.1; 3 - 0.2

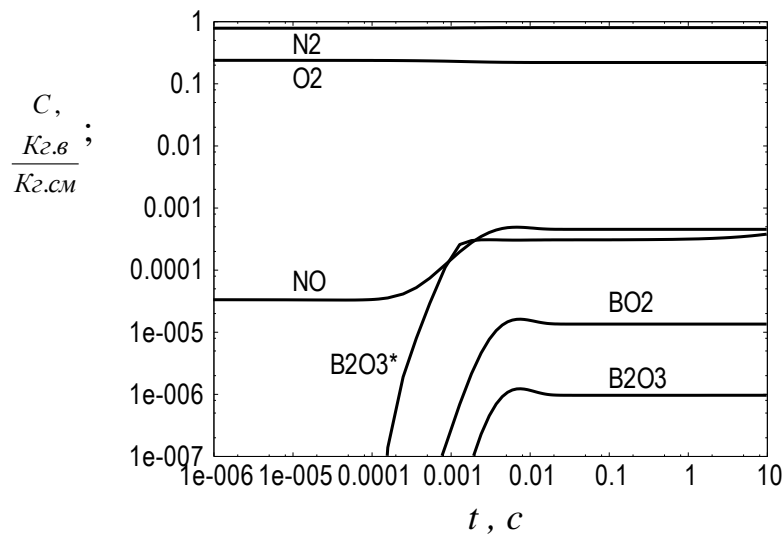


Рис. 16. Зависимость массовых концентраций продуктов сгорания бора в воздухе в волне горения от времени. $M_B / M_{Air} = 0.01$

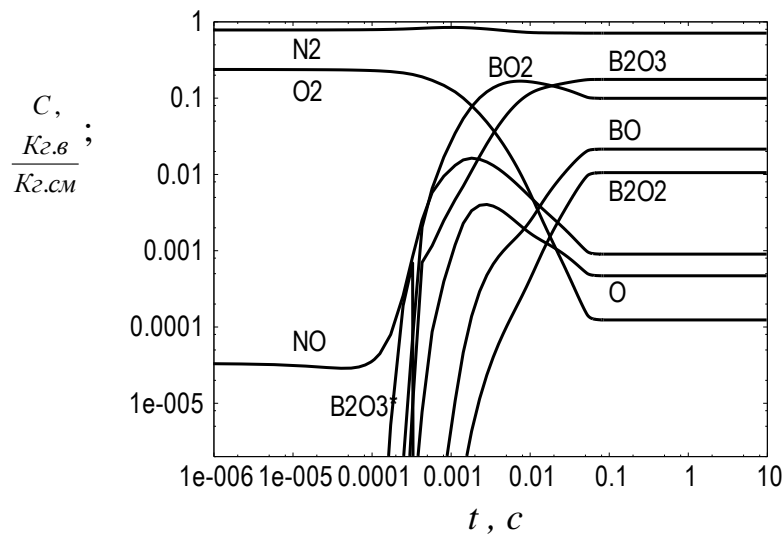


Рис. 17. Зависимость массовых концентраций продуктов сгорания бора в воздухе в волне горения от времени. $M_B / M_{Air} = 0.1$

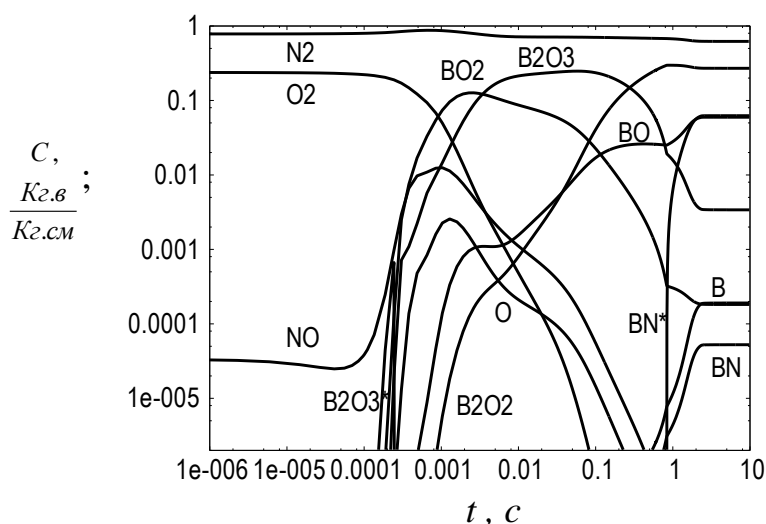


Рис. 18. Зависимость массовых концентраций продуктов сгорания бора в воздухе в волне горения от времени. $M_B / M_{Air} = 0.2$

Исследовалась зависимость протекания процессов в волне горения от соотношения бора и воздуха $m_B / m_{air} = 0.01, 0.1, 0.2$ (рис. 12-18). Максимальная температура достигается при $m_B / m_{air} = 0.1$ и превосходит 2800 К (рис. 12), давление в волне горения падает почти в два раза, при $m_B / m_{air} = 0.1$ (рис. 14, 15) частицы полностью испаряются, при $m_B / m_{air} = 0.01$ (рис. 15) частицы полностью состоят из оксида бора, в составе продуктов сгорания (рис. 16) присутствует мелкодисперсный оксид бора. При $m_B / m_{air} = 0.2$ (рис. 14-15) частицы на момент выхода на равновесие полностью состоят из бора, в составе продуктов сгорания (рис. 18) присутствует мелкодисперсный нитрид бора.

Разработаны физико-математическая модель, вычислительные алгоритмы и комплекс программ для расчета стационарной волны горения в горючей смеси частиц бора с воздухом.

Проведено численное моделирование стационарных волн горения в стандартных условиях при отношении начальных масс бора и воздуха в диапазоне от 0.01 до 1. Расчетным путем получена структура стационарных

волн горения и детонации, включающая нагрев, плавление, испарение, воспламенение и изменение состава частиц и соответствующее изменение температуры и состава газофазных продуктов сгорания, образование мелкодисперсных частиц бора, оксида бора и нитрида бора. Исследовано влияние массовой доли бора на максимальную скорость воздуха при которой существует стационарная волна горения.

В целом полученные результаты показывают, что разработанная модель является физически не противоречивой и внутренне согласованной, позволяющей получать результаты качественно совпадающие (в ряде случаев и количественно) с экспериментальными данными. Для обеспечения количественного совпадения расчетных и экспериментальных данных необходимо дальнейшее проведение исследований связанное с уточнением модели горения двухкомпонентной частицы бора, уточнения состава продуктов сгорания бора в воздухе, необходимо осуществить подбор констант, входящих в модель, на предмет более полного соответствия экспериментальным данным по горению бора.

Выводы

Разработаны физико-математическая модель, вычислительные алгоритмы и комплекс программ для расчета стационарных волн воспламенения и детонации в горючей смеси частиц бора с воздухом, которые могут быть использованы при моделировании многомерных течений.

Проведено численное моделирование стационарных волн горения и детонации в стандартных условиях при отношении начальных масс бора и воздуха в диапазоне от 0.03 до 2. Расчетным путем получена структура стационарных волн горения и детонации, включающая нагрев, плавление, испарение, воспламенение и изменение состава частиц и соответствующее изменение температуры и состава газофазных продуктов сгорания, образование мелкодисперсных частиц бора, оксида бора и нитрида бора. Исследовано влияние массовой доли бора на минимальную скорость стационарной детонации и максимальную скорость стационарной волны горения.

Показано, что разработанная модель воспроизводит три режима нагрева частиц бора [17]: без воспламенения частиц; воспламенение с погасанием; воспламенение.

Расчетным путем получено, что параметры стационарных волн горения и детонации асимптотически стремятся к равновесным значениям – точке на равновесной адиабате.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-08-01066-а).

Библиографический список

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачаев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах - М.: Наука, 1972. - 294 с.

2. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем.- Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2003. - 200 с.
3. Медведев А.Е., Федоров А.В., Фомин В.М. Описание горения смесей газа и твердых частиц методами механики сплошной среды // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. №2. С. 3-9.
4. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. Модель горения мелких капель металла // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 3. С. 366.
5. Дрегалин А.Ф., Зенуков И.А., Крюков В.Г., Наумов В.И. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергоустановках / Под ред. В.Е. Алемасова. - Казань: Изд-во Казанского университета, 1985. - 263 с
6. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Гетерогенная детонация // В кн. Законы горения / Под ред. Ю.В.Полежаева. - М.: Энергомаш, 2006, С. 276-302.
7. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. К теории горения частицы бора в гислороде при высоких температурах // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15. № 6. С. 5-13.
8. Ильин А.П., Громов А.А. Горение порошков алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: ТГУ, 2002. - 154 с.
9. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П. и др. Горение нанопорошков металлов / Под ред. А.А. Громова – Томск: Дельтаплан, 2008, - 382 с.
10. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 432 с.

11. Давидчук Е.Л., Димитров В.И., Рафалович М.Л., Тулупов Ю.И., Славинская Н.А. Кинетика горения бора в сухом воздухе// Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 1. С. 45-52.
12. Давидчук Е.Л., Димитров В.И., Залож В.А., Славинская Н.А., Тулупов Ю.И. Коэффициенты переноса продуктов горения бора в сухом воздухе // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 1. С. 52-56.
13. Гидаспов В.Ю. Численное моделирование стационарных детонационных волн в смеси частиц алюминия с воздухом // Труды МАИ, 2011, № 49: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=27665&PAGEN_2=3
14. Пирумов У.Г. Математическое моделирование в проблемах охраны воздушного бассейна.- М.: Изд-во МАИ, 2001.-340с.
15. Волков В.А., Гидаспов В.Ю., Пирумов У.Г., Стрельцов В.Ю. Численное моделирование течений реагирующих газочапельных и газовых смесей в экспериментах по воспламенению метанола // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 3. С. 424-434.
16. Гидаспов В.Ю., Москаленко О.А., Пирумов У.Г. Численное моделирование стационарных детонационных волн в газовых и газочапельных реагирующих смесях // Вестник Московского авиационного института, 2009, Т. 16, № 2, С. 51-61.
17. Гидаспов В.Ю. Численное моделирование стационарных волн горения и детонации в смеси частиц магния с воздухом // Труды МАИ, 2013, № 66: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40233>

18. Ревизников Д.Л., Способин А.В. Расчет обтекания тел сверхзвуковым потоком с примесью частиц полидисперсного состава. // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т.20. №3, С. 205-211.
19. Винников В.В., Ревизников Д.Л., Способин А.В. Использование частиц-представителей при прямом численном моделировании обтекания преграды запыленным потоком // Труды МАИ, 2011, №46:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=26042>
20. Франк-Каменецкий. А.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М: Наука, 1987. - 502 с.
21. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. - М.: Наука, 1978, 328 с.