Посвящается году Науки и Технологий

МАТЕРИАЛЫ XXII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ

ВМСППС’2021

4–13 сентября 2021 г.
Алушта, Крым

УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 22.2:2218
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2021. — 696 с.: ил.**

ISBN 978-5-4316-0824-7

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые достижения в вычислительной механике, механике деформируемого твердого тела, механике жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механике, прикладной математике, разработке прикладных программных средств.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике
и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021),
4–13 сентября 2021 г., Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 11.08.2021. Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 56,55
Тираж 400 экз. Изд. №959. Заказ №251

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Компания АРТИШОК»,
125362, Москва, Волоколамское шоссе, д. 116, стр. 2, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0824-7

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2021

тельной релаксации в рамках многотемпературных приближений с сохранением вычислительной эффективности.

При рассмотрении трехтемпературного приближения релаксация молекул происходит за счет межмодовых $VV_{2\text{-}3}$- и $VV_{1\text{-}2\text{-}3}$-обменов и VT_2-переходов поступательной энергии в колебательную энергию деформационной моды. В выбранном подходе при работе с релаксационными членами необходимо вычислять вероятности соответствующих переходов. В работе сравниваются разные модели для вероятностей переходов: теория возмущения первого порядка (SSH) [4] и модель нагруженного гармонического осциллятора (FHO) [5, 6].

Проведено сравнение точной модели для вычисления правых частей релаксационных уравнений, основанной на методах кинетической теории, с модифицированным подходом Ландау–Теллера для определения границ применимости упрощенных методов расчета. Оценивается влияние различных моделей времен релаксации на распределение газодинамических параметров за ударными волнами.

1. *Kosareva A., Kustova E., Mekhonoshina M.* Simulations of CO_2 multi-temperature vibrational kinetics on the basis of new relaxation time models // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021 (принято в печать).
2. *Kustova E., Mekhonoshina M.* Multi-temperature vibrational energy relaxation rates in CO_2 // Phys. Fluids. — 2020. — V. 32. — P. 096101.
3. *Kosareva A., Kunova O., Kustova E., Nagnibeda E.* Four-temperature kinetic model for CO_2 vibrational relaxation // Phys. Fluids. — 2021. — V. 33. — P. 016103.
4. *Schwartz R., Slawsky Z., Herzfeld K.* Calculation of vibrational relaxation times in gases // J. Chem. Phys. — 1952. — V. 20. — P. 1591.
5. *Adamovich I. V., Macheret S. O., Rich J. W., Treanor C. E.* Vibrational energy transfer rates using a forced harmonic oscillator model // J. Thermophys.Heat Transfer. — 1998. — V. 12. — P. 57–65.
6. *Vargas J., Lopez B., Lino da Silva M.* Heavy Particle Impact Vibrational Excitation and Dissociation Processes in CO_2 // J. Phys. Chem. A. — 2021. — V. 125, Iss. 2. — P. 493–512.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ СТАРТА РН С РДТТ*

К. В. Костюшин, И. В. Еремин, А. А. Глазунов, А. В. Червакова, А. М. Кагенов

НИИПММ ТГУ, Томск, Россия

В работе рассматривается задача математического моделирования газовой динамики старта РН на нестационарных режимах работы РДТТ с учетом изменения поверхности горения заряда твердого топлива (ТТ) и силового взаимодействия сверхзвуковых струй продуктов сгорания с поверхностью старта и элементами конструкции РН. Работа крупногабаритных РДТТ характеризуется неравномерным выгоранием заряда ТТ по длине канала, что в случае исследования нестационарных процессов приводит к необходимости учета изменения геометрии заряда. Учитывается, что РН находится под действием газодинамических сил (сил тяги, аэродинамического сопротивления) и силы тяжести. Истекающая струя газообразных продуктов сгорания взаимодействует с неподвижной поверхностью старта и движущимися элементами конструкции РН.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-19-00541).

Схема расчетной области показана на рис. 1 и включает в себя: 1 — внешний корпус РН; 2 — заряд ТТ; 3 — газодинамический тракт РД; 4 — поверхность горения заряда ТТ; 5 — корпус камеры сгорания; 6 — сопловой блок РД; 7 — сопловая заглушка; 8 — ось симметрии; 9–10 — внешние границы расчетной области; 11 — непроницаемая поверхность старта; 12 — внешняя расчетная область.

Предполагается, что в начальный момент времени фронт горения моментально распространяется по всей поверхности заряда твердого топлива. Продукты сгорания представляют собой невязкий сжимаемый идеальный газ. Для численного решения уравнений Эйлера используется схема Годунова, адаптированная к произвольному количеству граней в расчетной ячейке. Для построения разностной схемы используется метод конечных объемов.

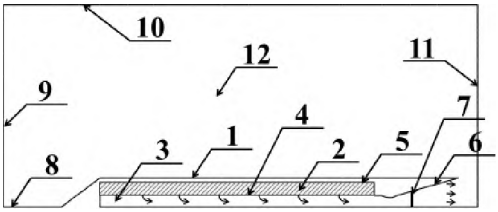

Рис. 1. Схема расчетной области

Для моделирования процесса выгорания заряда твердого топлива используется методика, основанная на аппроксимации формы канала заряда совокупностью граней элементарных ячеек, расположенных в окрестности поверхности горения. Для определения нового положения поверхности горения и локального газоприхода используется степенной закон горения. Для определения характеристик движения ракетоносителя на текущем шаге по времени вычислялась равнодействующая газодинамических сил и силы тяжести.

Проведены численные исследования газодинамики старта модельного осесимметричного твердотопливного ускорителя. В расчетах приняты следующие характеристики модельного РН: длина РН 20,5 м; длина соплового блока 4,3 м; диаметр РН — 3 м; радиус входного сечения сопла 0,6 м; радиус критического сечения 0,5 м; радиус среза сопла 1,5 м. Рассмотрен характерный для стартовых ускорителей модельный цилиндрический одношашечный заряд ТТ внутреннего горения. Длина заряда твердого топлива 14,2 м; радиус внутренней поверхности заряда ТТ 0,6 м; масса ускорителя (с учетом заряда твердого топлива) 187000 кг; плотность ТТ $\rho_f = 2200$ кг/м^3; температура продуктов сгорания 3400 К; равновесный показатель адиабаты газообразной смеси двухфазных продуктов сгорания 1,16; константы в законе скорости горения ТТ: $u_0 = 0{,}006$ м/с, $\nu = 0{,}3$. Расстояние от среза сопла до поверхности старта в начальный момент времени составляет 1 м.

В качестве начальных условий в расчетной области 12 (рис. 1) принимались условия невозмущенной окружающей среды у поверхности Земли: $P_a = 101325$ Па, $T_a = 300$ К. На границах 1, 5, 6 и 11 задавались граничные условия непротекания; на границе 8 — условия симметрии; на гранях ячеек лежащих на поверхности горения (граница 4) — локальный газоприход; на границе 9 — параметры набегающего потока соответствующего скорости РН на текущем шаге по времени; на границе 10 — мягкие граничные условия. Расчеты проведены в осесимметричной постановке, использовалась блочно-структурированная расчетная сетка. В начальный момент времени размер расчетной сетки в свободном объеме камеры сгорания составлял 200×10 ячеек, в сопловом блоке — 60×20 ячеек. Расчет проведен до момента времени $t = 2{,}9$ с, что соответствует выходу РД на номинальный режим работы и удалению РН от поверхности старта на расстояние равное $4L_{\text{уск}}$. В типовом варианте расчета общее число ячеек в момент времени $t = 0$ с составляло порядка $1 \cdot 10^4$, а в момент времени $t = 2{,}9$ с — $8 \cdot 10^4$.

Проведен анализ нестационарного силового воздействия сверхзвуковой струи на поверхность старта. Наблюдается четыре локальных пика давления в моменты времени $t = 0{,}83$ с, 1,3 с, 1,6 с, 1,9 с, которые соответствуют промежуточному расположению поверхности старта в окрестности дисков Маха невозмущенной струи. Максимум давления на преграде составляет 14,6 бар в момент времени $t = 0{,}83$ с, что соответствует взаимодействию сверхзвуковой струи продуктов сгорания с поверхностью старта в области скачка уплотнения на первом диске Маха. Минимальное силовое воздействие на преграду соответствует взаимодействию в сечениях 2–5 бочек невозмущенной струи. Следует отметить, что наличие заглушки приводит к увеличению максимального давления на поверхности старта на этапе выхода двигателя на режим (от 0 до 0,03 с) с 3,8 бар (без заглушки) до 10 бар (при усилии срабатывания в 15 бар). Это обусловлено взаимодействием сверхзвуковой струи с преградой на расстоянии 1 м от среза сопла, после прорыва мембраны. Проведен анализ энерготяговых характеристик РД на исследованных нестационарных режимах работы для конфигурации РДТТ без сопловой заглушки. В интервале от 0 до 0,01 с продукты сгорания заполняют свободный объем камеры сгорания, расход газа через выходное сечение сопла равен нулю, общая тяга РД определяется исключительно нестационарной составляющей тяги. Этот период характеризуется резким ростом изменения количества движения продуктов сгорания по объему камеры (до 25% от общей тяги) и сопловому блоку (до 75%). На временном интервале от 0,03 до 0,3 с вклад нестационарной составляющей тяги уменьшается с 12 до 0,2%, статической с 20 до 3%, при этом рост тяги происходит в основном за счет нарастающего действия сил давления на заднее днище камеры сгорания РД.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПРЕГРАДОЙ*

К. В. Костюшин, А. В. Червакова, А. М. Кагенов, А. А. Глазунов

НИИПММ ТГУ, Томск, Россия

В работе исследовалась структура двухкомпонентной сверхзвуковой струи при взаимодействии с плоской преградой при разных степенях нерасчетности. Нестационарное пространственное течение идеального многокомпонентного газа можно описать системой уравнений Эйлера, в которую добавлены законы сохранения для дополнительных компонентов смеси газов [1, 2]:

$$\frac{d}{dt}\Big(\iiint\limits_G \rho\, dG\Big) + \oint\limits_S \rho\mathbf{v}\cdot d\mathbf{S} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}\Big(\iiint\limits_G \rho\mathbf{v}\, dG\Big) + \oint\limits_S (\rho\mathbf{v}\mathbf{v} + p\widehat{\mathbf{I}})\cdot d\mathbf{S} = 0; \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt}\Big(\iiint\limits_G e\, dG\Big) + \oint\limits_S (e+p)\mathbf{v}\cdot d\mathbf{S} = 0, \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}\Big(\iiint\limits_G \rho\alpha_n\, dG\Big) + \oint\limits_S \rho\alpha_n\mathbf{v}\cdot d\mathbf{S} = 0, \tag{4}$$

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект №0721-2020-0032).