

УДК 533.6.011.55, 6.013

О ТОЧНОСТИ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ СНИЖЕНИЯ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ВРЕМЕННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

© 2022 г. А. М. Tahsini¹, *, Anbuselvan K. K. N.²

¹*School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*

²*Airbus India Private Limited, Bangalore, India*

*E-mail: am_tahsini@iust.ac.ir

Поступило в редакцию 13.07.2019 г.

После доработки 15.08.2020 г.

Принято к публикации 02.02.2021 г.

С помощью нестационарного численного моделирования исследуется возможность снижения гидродинамического сопротивления затупленных тел в гиперзвуковом потоке в результате хромирования. Основное внимание уделяется оценке временных масштабов различных протекающих физико-химических процессов. Предложен временной интервал для гиперзвуковых испытательных установок, предназначенных для изучения физики подобных потоков.

DOI: 10.31857/S0040364422010239

ВВЕДЕНИЕ

Существует несколько конструктивных решений для высокоскоростных летающих тел, особенно для гиперзвуковых, позволяющих уменьшать силы сопротивления. К ним относятся использование шипов на тупом теле, выделения энергии, а также встречных струй. Это приводит к уменьшению волнового сопротивления за счет снижения поверхностного давления, создания разреженного потока, в котором тело может перемещаться, или за счет того, что фронт ударной волны отодвигается дальше от носовой части объекта. Перечисленные методы продемонстрировали существенное снижение гидродинамического сопротивления, но их практическое применение усложняет систему или ограничивается наличием побочных эффектов.

Самый современный из предложенных методов заключается в использовании хромирования, в результате которого подвод тепла в ударном слое достигается за счет экзотермической реакции аблированного хрома с кислородом за ударной волной. Эксперименты, проведенные в потоке при числе Маха 8 и с удельной общей энтальпией 3.4 МДж/кг, показали снижение сопротивления на 47% и увеличение безразмерного расстояния до ударной волны на 18% за счет химических реакций и выделения тепла [1]. Численные расчеты такие данные не подтверждают [2, 3], что вызывает сомнение в достоверности полученных экспериментальных результатов.

В недавнем экспериментальном исследовании при энтальпии торможения 6.31 МДж/кг и набе-

гающем потоке с числом Маха 9.84 сообщается о некоторых новых значениях измеренного расстояния до ударной волны и теплового потока [4]. Эксперименты проведены в ударной трубе с эффективным установившимся временем испытаний около 315 мкс. Измерения и анализ данных в гиперзвуковых ударных трубах сложны из-за короткого времени испытаний и требуют глубоких знаний о явлениях в нестационарном потоке.

Временные масштабы различных характеристик потока очень важны при проведении экспериментов и численном анализе. В настоящей работе поле обтекания исследуется с использованием нестационарного численного моделирования.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для исследования осесимметричного сжимаемого химически реагирующего поля обтекания использованы основные уравнения сохранения массы, импульса, энергии и химических веществ из [2]. Рассмотрена одностадийная химическая реакция хрома с кислородом $2Cr + O_2 \rightarrow 2CrO$. Теплоты образования Cr и CrO составляют 397 и 186 кДж/моль соответственно. Энергия активации реакции – 1.256 кДж/моль, скорость реакции выбрана равной 2.2×10^{15} . Температура плавления хрома – 2180 К, плотность – 7160 кг/м³, теплота парообразования – 6.6×10^6 Дж/кг.

Теплообмен с твердой фазой моделируется с использованием нестационарного одномерного уравнения сохранения энергии. Схема теплообмена

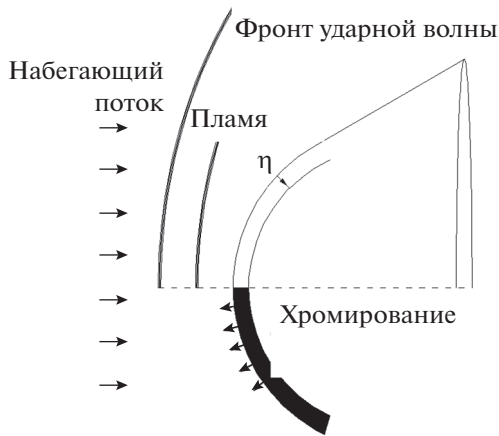


Рис. 1. Схематическое представление задачи.

представлена на рис. 1. Скорость уменьшения слоя покрытия рассчитывается из уравнения энергии на границе газа и твердого тела:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + \dot{r} \frac{\partial T}{\partial \eta},$$

$$q_g = q_s + \rho_s \dot{r} H_s.$$

Для дискретизации уравнений для газовой фазы используется метод конечных объемов. Вязкие слагаемые рассчитываются с использованием центральной схемы, а невязкие – методом AUSM⁺. Разработанный численный код был проверен с использованием различных экспериментальных данных и подробно описан в [2, 3, 5–7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах, проведенных при энтальпии торможения 6.31 МДж/кг, числе Маха набегающего потока 9.84 и давлении 150 Па на тупом конусе с радиусом вершины 30 мм и конической юбкой с углом полураствора 30°, за счет применения покрытия из 99% чистого хрома толщиной 10 мкм получено увеличение безразмерного расстояния между телом и отошедшей ударной волной с 0.127 до 0.148, что составляет 17% [4]. Сначала исследовался тупой конус без покрытия. Численное моделирование при набегающем потоке с более высокой энтальпией показывает, что безразмерное расстояние до ударной волны составляет 0.1. Точность измеренных данных – 27%. Интересно отметить, что если свойства воздуха поддерживаются постоянными, а высокотемпературные эффекты игнорируются в условиях гиперзвукового потока, то расчетное расстояние до ударной волны составляет 0.121, что близко к полученному ранее экспериментальному значению. Вопрос в том, почему экспериментальное измерение почти согласуется с результатами для “замороженного” воздуха, а не для воздуха с учетом высокотемпературных эффектов.

Несмотря на то, что воздействие высоких температур уменьшает расстояние с 0.121 до 0.1, экспериментальные измерения дают значение 0.127 [4].

Для исследования различных временных масштабов, связанных с физико-химическими процессами поля обтекания, выполняется нестационарное численное моделирование потока. Рассматриваемая физика потока имеет три различные фазы с собственным временным масштабом: фаза установления течения вокруг конуса длительностью τ_F (первая фаза), фаза нагрева покрытия длительностью τ_H (вторая фаза) и фаза химической реакции длительностью τ_C (третья фаза). Сначала проводится нестационарное численное моделирование стабилизации потока вокруг конуса путем применения граничного условия адиабатической стенки для оценки требуемого времени развития обтекания. Результаты показывают, что время стабилизации потока τ_F равно примерно 50 мкс, что достаточно мало и составляет 1/6 от эффективного установившегося времени испытания 315 мкс. Температура торможения потока составляет 3330 К, а время стабилизации рассчитывается с использованием критерия запаса изменения температуры $\pm 1\%$.

Прежде чем анализировать временной масштаб стадии нагрева, исследовалось время реакции в газовой фазе. Для нахождения начальных условий сначала моделировалось стационарное поле обтекания путем задания постоянной температуры стенки, равной температуре плавления хрома 2180 К. Затем для определения времени реакции в газовой фазе выполнялось моделирование нестационарного сопряженного реагирующего потока с использованием заранее определенных начальных условий. Установлено, что время реакции в газовой фазе τ_C составляет около 50 мкс, что близко к времени стабилизации потока. Кроме того, результаты расчета показали, что безразмерное расстояние до отошедшей ударной волны увеличивается с 0.1 до 0.111, т.е. на 11% против 17% в ранее опубликованных данных [4].

В заключение дается оценка длительности фазы нагрева – времени, необходимого для нагрева покрытия до температуры плавления и инициирования газофазных реакций. Численное моделирование нестационарных сопряженных задач теплообмена требует большого времени, при этом необходимо отдельно рассчитывать задачу для газовой и твердой фаз и выполнить процедуру быстрее. Поскольку коэффициент теплообмена газовой фазы является функцией поля обтекания, а температура поверхности твердой фазы не оказывает на него заметного влияния, достаточно найти значение данного коэффициента из решений для газовой фазы в стационарном состоянии. Это можно сделать с помощью численного моделирования двух различных состояний поля обтекания: сначала с применением адиабатического граничного усло-

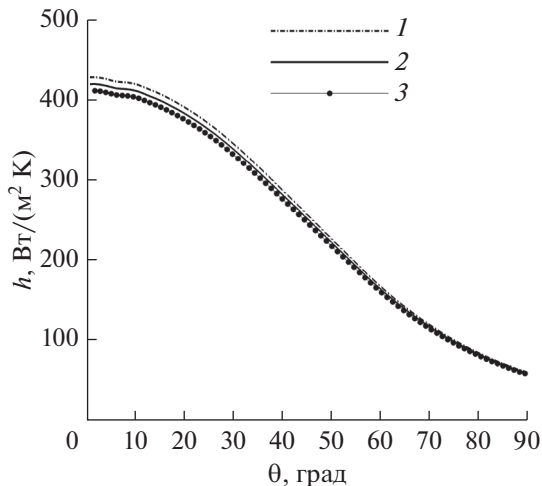


Рис. 2. Коэффициент теплообмена на конусе при различных температурах поверхности: 1 – $T_w = 300$ К, 2 – 1000, 3 – 2180.

вия (для определения адиабатической температуры стенки), а затем с применением граничного условия с постоянной температурой (для определения теплового потока) [8]. Наконец, используя вычисленный коэффициент теплообмена, уравнение нестационарной теплопроводности можно решить для твердой фазы при описании нестационарного нагрева твердой фазы.

Рассчитанный таким образом коэффициент теплообмена представлен на рис. 2 в диапазоне от начальной температуры поверхности до температуры плавления хрома, что подтверждает предположение о постоянстве коэффициента теплообмена. С учетом среднего значения коэффициента теплообмена $418 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ в области торможения время нагрева, рассчитанное путем моделирования нестационарной теплоотдачи для хромового покрытия, составило примерно 0.073 с (рис. 3). Следует подчеркнуть, что при удалении от точки торможения коэффициент теплообмена уменьшается, а время нагрева еще больше увеличивает-

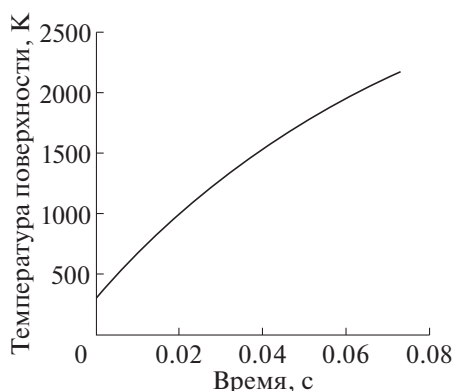


Рис. 3. Температура поверхности в точке торможения при нагреве.

ся и составляет 0.09 с для точки, расположенной под углом 30° на тупом конусе.

Можно сделать вывод о том, что временной масштаб для фазы нагрева τ_H является самым большим. По результатам расчета его значение составляет около 0.073 с , что намного больше времени стационарных испытаний, составляющего всего 315 мкс , или даже общего времени эксперимента, равного примерно 0.003 с . Это второе противоречие, наблюдаемое между измерениями теплового потока и временным масштабом для реакции с хромом в работе [4], следовательно, не должно быть никаких признаков химической реакции с хромом за столь короткое время испытаний во время экспериментов в ударной трубе. Таким образом, требуемое время испытаний в потоке должно составлять порядка 0.1 с , а ударные трубы не подходят для таких исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнены оценки временных масштабов трех различных процессов: установления потока, нагрева поверхности и реакции в газовой фазе, проявляющихся при гиперзвуковом обтекании хромированных тел. Показано, что фаза нагрева является ключевой и наиболее длительной по времени. Требуемый временной диапазон испытательных установок для экспериментального изучения таких полей обтекания составляет около 0.1 с , а ударные трубы не подходят для проведения подобных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulkarni V., Hegde G.M., Jagadeesh G., Arunan E., Reddy K.P.J. Aerodynamic Drag Reduction by Heat Addition into the Shock Layer for a Large Angle Blunt Cone in Hypersonic Flow // *Phys. Fluids*. 2008. V. 20. № 8. 081703.
2. Tahsini A.M. Heat Release Effects on Drag Reduction in High Speed Flows // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. V. 57. № 2. P. 657.
3. Tahsini A.M. Parametric Study of the Effect of Exothermic Coating Properties on Blunt Nose Drag Reduction in Hypersonic Flights // *J. Aerospace Engng. IMechE*. 2014. V. 228. № 9. P. 1461.
4. Deep S., Jagadeesh G. Aerothermodynamic Effects of Controlled Heat Release within the Hypersonic Shock Layer Around a Large Angle Blunt Cone // *Phys. Fluids*. 2018. V. 30. 106103.
5. Tahsini A.M. Combustion Efficiency and Pressure Loss Balance for the Supersonic Combustor // *J. Aerospace Engng. IMechE*. 2020. V. 234. № 6. P. 1149.
6. Tahsini A.M. Suppression of the Detonation Wave with the Aid of a Multi-Component Particle Cloud // *J. Appl. Mech. Technical Phys*. 2020. V. 61. № 1. P. 54.
7. Tahsini A.M. Regression Rate Response in Spin-stabilized Solid Fuel Ramjets // *J. Mech*. 2020. V. 37. P. 37.
8. Tahsini A.M., Hosseini S.A. An Accurate Prediction of Surface Temperature History in a Supersonic Flight // *Int. Conf. Fluid Mechanics, Heat Transfer and Thermodynamics*, Istanbul, Turkey, December 5–6, 2013.