

1. Тема работы

Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов

2. Состав коллектива

- Поплавская Татьяна Владимировна, д.ф.-м.н., в.н.с. ИТПМ СО РАН
- Кириловский Станислав Викторович, к.ф.-м.н., н.с. ИТПМ СО РАН
- Решетова Анна Игоревна, младший лаборант исследователь ИТПМ, аспирант ФФ НГУ

3. Информация о гранте

Работа выполнена по госбюджетной тематике ИТПМ СО РАН

4. Анотация

В работе рассматривается задача развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием под углом атаки в гиперзвуковом потоке ($M_\infty=8.44$) колебательно возбужденных смесей углекислого газа и азота. Экспериментальное измерение среднеквадратичных пульсаций на поверхности пластин проведено в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Численное моделирование выполнено на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса и двухтемпературной модели релаксационных течений. При моделировании реального пористого покрытия используется скелетная модель, представляющая собой набор квадратных элементов, расположенных в шахматном порядке, с расстоянием между элементами, равным диаметру пор звукопоглощающего материала, используемого в эксперименте. Представлены данные по динамике развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием при разных условиях набегающего потока. Проведено исследование влияния различных параметров звукопоглощающего покрытия (глубина, длина и расположение на пластине). Показано, что звукопоглощающее покрытие существенно ослабляет (до 50%) интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины по сравнению со сплошной поверхностью. Показано согласие расчетных и экспериментальных данных по пульсациям давления на поверхности пластин.

5. Научное содержание работы

5.1. Введение

Возможность управлять интенсивностью возмущений в пограничных слоях и переходом к турбулентности является одним из важных аспектов разработки перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. В условиях реального полета, где наблюдаются большие скорости и температуры, проявляются эффекты реального газа, связанные с возбуждением колебательных степеней свободы молекул и неравновесностью течения. Свойства реального газа существенно влияют как на среднее течение вокруг летательного аппарата, так и на развитие возмущений. Лётные исследования устойчивости течений колебательно возбужденных газов конструктивно сложны и достаточно дорогостоящи, поэтому важным становится численное моделирование и проведение экспериментальных исследований в аэродинамических трубах.

Возмущения, формирующиеся в ударном слое, сносятся вниз по потоку и оказывают влияние на развитие возмущений и ламинарно-турбулентный переход в гиперзвуковом пограничном слое модели в целом. На данный момент имеется большой научный опыт в исследовании влияния физико-химических процессов в газах на среднее течение при обтекании тел гиперзвуковыми потоками. Однако, работ по исследованию устойчивости таких течений и управлению интенсивностью возмущений ограничено количество.

В настоящей работе исследуются процессы развития возмущений в вязком ударном слое на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим высокопористым покрытием в

гиперзвуковом потоке колебательно возбужденных смесей углекислого газа и азота с учетом колебательной неравновесности углекислого газа, а также влияние различных параметров звукопоглощающего покрытия (глубина, длина и расположение) на подавление пульсаций давления на поверхности модели в течениях релаксирующих газов.

5.2. Постановка задачи

В численном моделировании решалась задача взаимодействия двумерных акустических волн с вязким ударным слоем на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающей вставкой, обтекаемой высокотемпературным гиперзвуковым потоком газа. Рассматривались смеси CO_2 и N_2 в следующих соотношениях: Смесь1: $\text{CO}_2(0.44)/\text{N}_2(0.56)$ и Смесь2: $\text{CO}_2(0.214)/\text{N}_2(0.786)$. При обтекании сплошной пластины расчетная область представляла собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадает с поверхностью пластины. Для задачи обтекания пластины с пористой звукопоглощающей вставкой расчетная область дополняется подобластью, в которой напрямую моделируется скелет пористого материала (Рис. 1а).

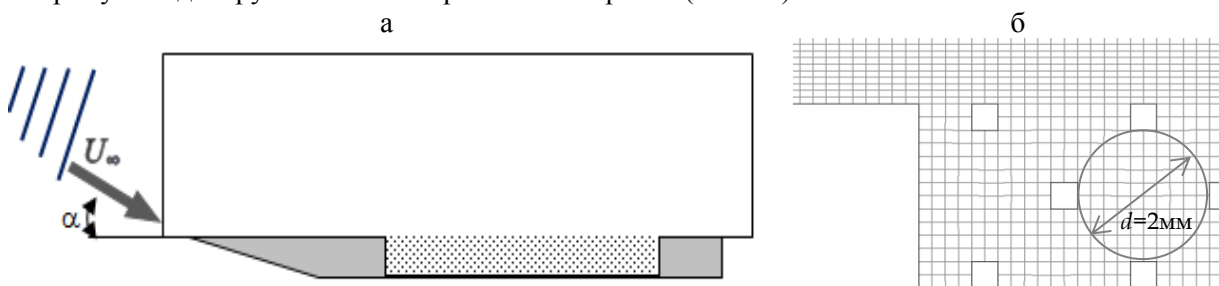


Рис.1. (а) – вид расчетной области для пластины со звукопоглощающим покрытием, (б) – фрагмент расчетной сетки

Численное моделирование проводилось на основе решения двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса (1-3), которые дополнялись уравнением состояния Менделеева – Клайперона (4). Поскольку характеристические колебательные температуры азота и нижнего колебательного уровня молекул углекислого газа равны 3340К и 960К, соответственно, для указанных выше условий эксперимента ($T_0 > 2000\text{K}$) доля колебательно возбужденных молекул азота мала, в то время как молекулы CO_2 колебательно возбуждены. Для расчета неравновесного течения к уравнениям Навье – Стокса добавлялись уравнения сохранения колебательной энергии для каждой из четырех колебательных степеней свободы молекул углекислого газа. В данной работе энергообмен между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы молекул CO_2 с конечным временем релаксации учитывался путем добавления к уравнениям энергии источниковых членов, рассчитываемых по уравнению Ландау – Теллера с помощью встраиваемого в пакет модуля UDF1

5.3. Результаты

На рис.2 приведена расчетная область задачи с наложенным полем мгновенных пульсаций давления на пластине со звукопоглощающим покрытием при воздействии быстрой акустической волны с частотой 160кГц. Видно, что возмущения, проходя через ударную волну, усиливаются, достигая максимума у поверхности пластины, затем затухают в пористой зоне. При этом в пористой зоне образуются стоячие волны, вызванные распространением и отражением возмущений от её нижней границы.

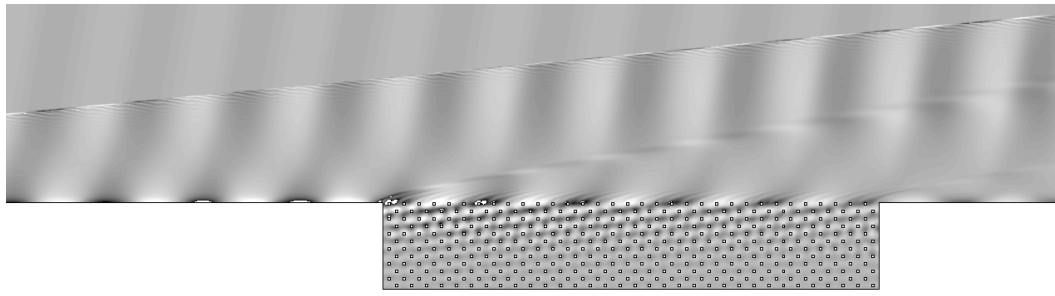


Рис.2. Фрагмент поля мгновенных пульсаций давления на пластине длиной 400мм со звукопоглощающим покрытием 2 при воздействии быстрой акустической волны с $f=160$ кГц для Смеси 1 под углом атаки $\alpha=10.2^\circ$

Звукопоглощающие покрытия 1 и 2 (см. рис.3) были расположены в области нарастания возмущений для пластины под углом атаки 10.2° , а покрытие 3 – в области максимума возмущений. Во всех трёх случаях звукопоглощающие покрытия эффективно снижают интенсивность пульсаций давления при частотах 120кГц и 160кГц (рис. 3). Однако, те, что расположены ближе к максимуму возмущений, более эффективны по снижению интенсивности пульсаций давления.

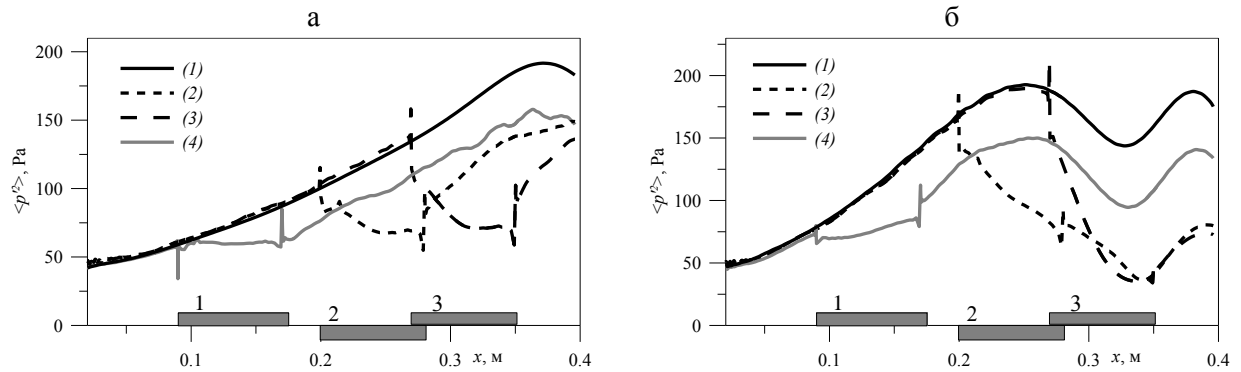


Рис.3. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1), пластины со звукопоглощающим покрытием 1 (2), с покрытием 2 (3) и с покрытием 3 (4) для Смеси 1 при $\alpha=10.2^\circ$: (а) при воздействии быстрой акустической волны с $f=120$ кГц и (б) при воздействии быстрой акустической волны с $f=160$ кГц.

Для исследования влияния длины звукопоглощающего пористого покрытия рассматривалось два случая: обтекание пластины с покрытием 2 длиной 80мм, расположенным в области максимума возмущений, и с покрытием 4, длиной в 2 раза больше (160мм) при воздействии внешних быстрых акустических волн. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Видно, что в обоих случаях пористое покрытие, установленное вблизи области локального максимума возмущений, существенно снижает пульсации давления. Увеличение длины звукопоглощающего покрытия приводит к большему подавлению пульсаций давления над ним, т.е. увеличивает (до 40%) эффективность снижения.

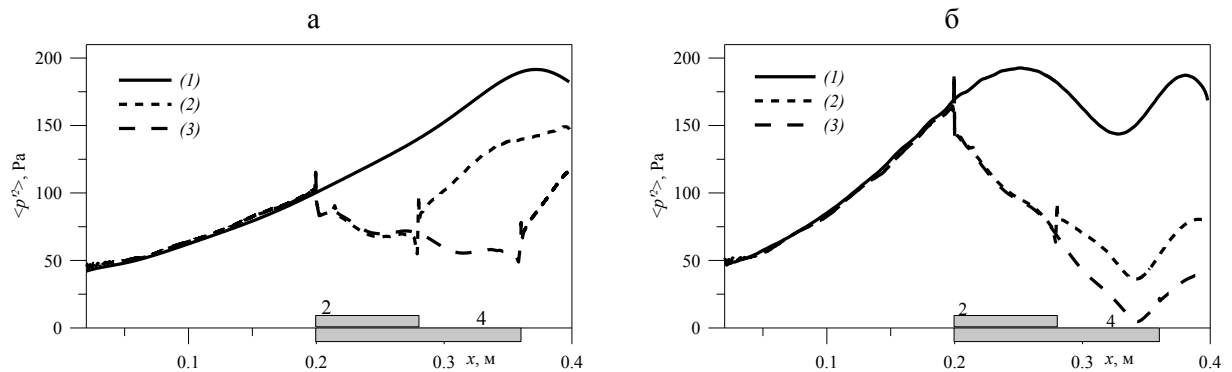


Рис.4. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1), пластины со звукопоглощающим покрытием 2 (2) и с покрытием 4 (3) для Смеси 1 при $\alpha=10.2^\circ$: (а) при воздействии быстрой акустической волны с $f=120$ кГц и (б) при воздействии быстрой акустической волны с $f=160$ кГц.

На рис. 5 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по отношению амплитуд пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием к пульсациям на сплошной пластине в точке $x=0.064$ м (место расположения датчика давления на пластине в эксперименте). Отношение амплитуд пульсаций давления показывает эффективность подавления возмущений звукопоглощающим пористым покрытием. Видно, что при обтекании пластины потоком колебательно возбужденных смесей CO_2 с азотом как в трубных экспериментах, так и численном моделировании для частот $f > 50$ кГц отношение амплитуд пульсаций давления меньше единицы, т.е. возмущения на поверхности пластины подавляются звукопоглощающим пористым на 20-50% в зависимости от угла атаки и частоты внешних акустических волн.

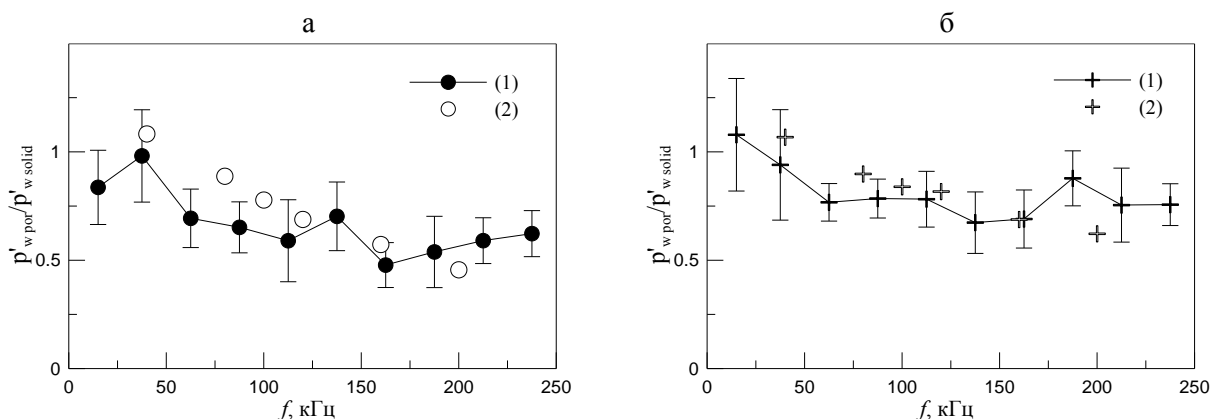


Рис.5. Эффективность снижения амплитуд пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием 5 в зависимости от частоты в сечении $x=0.064$ м (Смесь 2): (а) – $\alpha=10^\circ$, (б) – $\alpha=15^\circ$; 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Таким образом, метод пористых звукопоглощающих покрытий эффективно работает для подавления пульсаций давления при обтекании тел колебательно возбужденными смесями углекислого газа и азота под разными углами атаки.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Для выполнения подобных исследований необходимо большое количество параметрических расчётов. Использование кластера НГУ существенно ускоряет их проведение, а следовательно, и получение научных результатов.

7. Перечень публикаций

Reshetova A.I., Poplavskaya T.V., Tsyryulnikov I.S., Solov'eva O.V., Kirilovskiy S.V. Influence of the sound-absorbing coating structure on the disturbance evolution in the hypersonic flow of vibrationally excited gases // AIP Conference Proceedings 2027, 040007 (2018); doi: 10.1063/1.5065281

Reshetova A.I., Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V., Tsyryulnikov I.S. Modeling of interaction of long-wave disturbances with a shock wave on a flat plate with allowance for real gas effects // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012026 doi:10.1088/1742-6596/1128/1/012026

Решетова А.И., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2.