

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ТЕЧЕНИИ СМЕСИ КОЛЕБАТЕЛЬНО ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ НА ПЛАСТИНЕ СО ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ

– Решетова Анна Игоревна, младший лаборант исследователь ИТПМ, магистрант ФФ НГУ

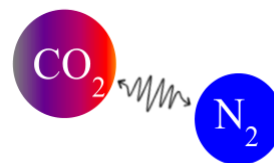
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-08-00674). Название проекта: «Исследование взаимодействия длинноволновых возмущений с ударной волной на клине и модовая декомпозиция возмущений сверхзвукового потока». Руководитель: Цырюльников Иван Сергеевич. Проект рассчитан на 2016-2018год

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 могут существенно повлиять на генерацию и развитие возмущений в пограничном слое, и как следствие на переход к турбулентности [1]. 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. Одним из известных методов управления ламинарно-турбулентным переходом в умеренно гиперзвуковых течениях является метод нанесения на поверхность звукопоглощающего покрытия [2].

Целью данной работы является исследование развития возмущений в вязком ударном слое на пластине, обтекаемой гиперзвуковым потоком смесей углекислого газа и азота, и исследование влияния высокопористых ячеистых звукопоглощающих покрытий на подавление возмущений на модели в гиперзвуковых потоках смесей колебательно возбужденных газов.

$$q_{iv}^{n(CO_2-CO_2)} = \frac{\rho}{\tau_{vt}^{(CO_2-CO_2)}} \left(e_v^{eq^n} - e_v^n \right), \quad q_{iv}^{n(CO_2-N_2)} = \frac{\rho}{\tau_{vt}^{(CO_2-N_2)}} \left(e_v^{eq^n} - e_v^n \right).$$



Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье –Стокса

в рамках модели термически совершенного газа, теплоёмкость которого зависит от температуры вследствие возбуждения колебательных степеней свободы молекул газа. Для расчета влияния колебательной релаксации молекул к уравнениям Навье – Стокса производилось добавление 4-х уравнений сохранения колебательной энергии (для каждой колебательной степени свободы молекул CO_2) и встраиваемых в пакет модулей для реализации двухтемпературной модели колебательной релаксации углекислого газа. В рамках этой модели изменение колебательной энергии от времени моделируется уравнением Ландау – Теллера, в котором учитывается конечность времени колебательной релаксации молекул CO_2 . Поскольку энергия колебательного возбуждения возникает за счет кинетической энергии теплового движения сталкивающихся молекул, в работе учитываются два канала колебательной релаксации молекул CO_2 (при взаимодействии молекул CO_2 друг с другом и при взаимодействии молекул CO_2 с молекулами N_2):

Акустические возмущения набегающего потока моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических волн на левой и верхней границах расчётной области.

Таблица

Условия	Содержание CO_2 [моль]	M_∞	U_∞ [м/с]	Re_1 [m^{-1}]	P_∞ [Па]	T_v [K]	T_0 [K]	T_w [K]
1	0,44	8,44	2255,41	$1,36 \times 10^6$	374,5	215	2430	300
2	0,22		2378,04					
3	0,88		2058,06					

На рис. 1 приведено сравнение расчетных данных с результатами трубных экспериментов для смеси CO_2 и воздуха, проведённых в аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН (условие 1 таблицы) [1]: рис.1а – положение головного скачка уплотнения, рис. 1б величина $p'_{1/2}/p'_1$ изменения амплитуд пульсаций давления вниз по потоку в ударном слое на пластине (индексы 1и 2 соответствуют положениям датчиков 1 и 2, расположенных на расстоянии 80мм и 180мм от носика пластины, соответственно). Видно, что для условий эксперимента [1] колебательная релаксация молекул CO_2 при взаимодействии с молекулами азота (2-ой канал колебательной релаксации) слабо влияет и на характеристики среднего течения, и на интенсивность возмущений.

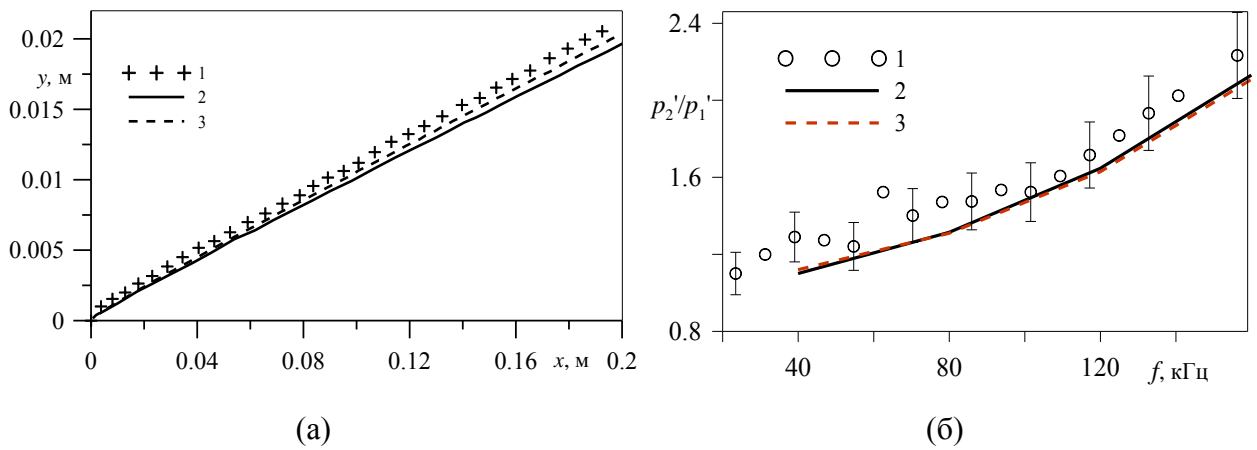


Рис.1. Положение ударной (а) волны и степени роста пульсаций давления на поверхности пластины (б) при воздействии быстрой акустической волны ($\alpha=10.2^\circ$, $L=200\text{мм}$): (1) – экспериментальные данные смеси CO_2 и воздуха, (2) – расчетные данные равновесного течения смеси CO_2 и N_2 , (3) – расчетные данные неравновесного течения смеси CO_2 и N_2

В данной работе исследовано влияние угла атаки ($\alpha=0\div 20^\circ$) на характеристики среднего течения и пульсации давления на поверхности пластины при разных частотах внешних акустических возмущений в гиперзвуковом потоке смеси колебательно возбужденных газов (условие 1 таблицы). Видно, что воздействие внешних акустических возмущений приводит к генерации в ударном слое нарастающих по длине пластины возмущений давления (рис.2б).

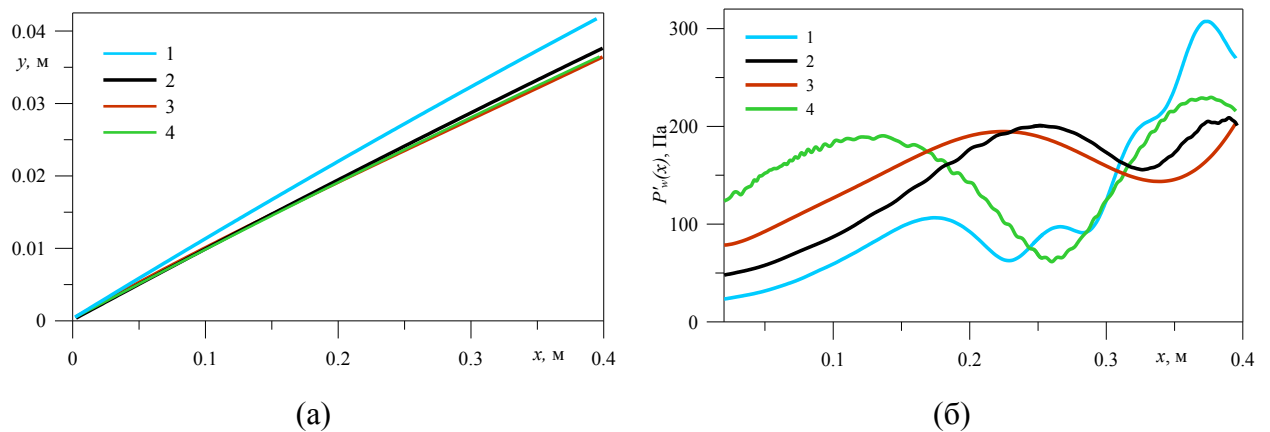


Рис.2. Расчетные данные по среднеквадратичным пульсациям давления на поверхности сплошной пластины: (1) – $\alpha=5^\circ$, (2) – $\alpha=10.2^\circ$, (3) – $\alpha=15^\circ$, (4) – $\alpha=20^\circ$ ($L=400\text{мм}$) при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160$ кГц и амплитудой $A=0.03$

В данной работе исследовано влияние концентрации CO_2 на характеристики среднего течения и развитие возмущений в ударном слое на пластине под углом атаки $\alpha=10.2^\circ$ в потоке смеси колебательно возбужденных газов. Параметры течения приведены в таблице. Показано, что повышение концентрации CO_2 в смеси увеличивает термическую неравновесность, и

интенсивность пульсаций давления на поверхности сплошной пластины снижается (рис 3).

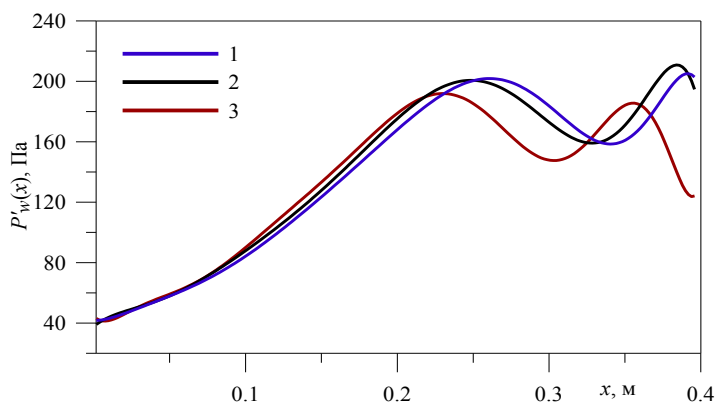


Рис.3. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности сплошной пластины при разных концентрациях CO_2 в смеси: (1) – 0,22mol , (2) – 0,44mol, (3) – 0,88mol ($L=400\text{мм}$) при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160\text{ кГц}$ и амплитудой $A=0.03$

Предыдущие исследования о развитии возмущений на сплошной пластине необходимы для решения задачи о влиянии звукопоглощающих покрытий. Полученные результаты помогли определить, при каких параметрах среднего течения и частотах внешнего акустического возмущения пульсации давления достигают максимума. Представление о картине развития возмущений в ударном слое позволяет приступить к исследованиям влияния пористых звукопоглощающих покрытий.

В численном моделировании использовалась скелетная модель пористой среды в виде квадратных элементов (рис. 3б). Геометрические размеры пор выбирались из соображений сходства со звукопоглощающими вставками: расстояние между элементами в продольном и поперечном направлениях равно диаметру пор материала (2мм). Размер элементов каркаса ВПЯМ (0.4мм×0.4мм) выбирался из соответствия коэффициенту пористости материала 0.95, а именно суммарная площадь элементов составляет только 5% площади пористой вставки. Эти элементы располагались в шахматном порядке друг за другом (рис. 3б). Такое расположение обеспечивает взаимодействие потока со всеми элементами модели скелета, как это имеет место в трубном эксперименте.

Звукопоглощающие вставки длиной 80мм и глубиной 14мм включены в расчетную область на расстоянии 90мм (вставка I), 200мм (вставка II) и 270мм (вставка III) от передней кромки пластины, расположенной под углом атаки 10.2° , а вставка III – в области максимума возмущений. Во всех трёх случаях звукопоглощающие покрытия эффективно

снижают интенсивность пульсаций давления при частотах выше 80кГц (рис. 4). Однако, звукопоглощающие покрытия, расположенные ближе к максимуму возмущений, более эффективны по снижению интенсивности пульсаций.

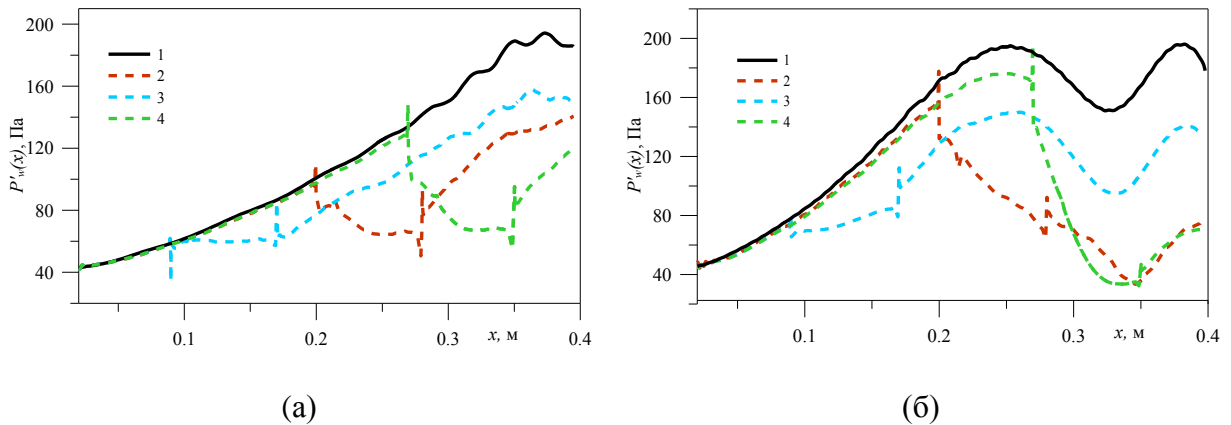


Рис.4. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности пластины при воздействии быстрой акустической волны с частотой (а) – $f=120\text{кГц}$, (б) – $f=160\text{кГц}$ и амплитудой $A=0.03$: (1) – сплошная пластина, (2) – пластина с покрытием I, (3) – пластина с покрытием II, (4) – пластина с покрытием III (условия 1 таблицы, $L=400\text{мм}$)

Для исследования влияния длины пористого покрытия рассматривалось 2 случая: обтекание пластины со вставкой I длиной 80мм, расположенной в области максимума возмущений, и со вставкой IV, длина которой увеличена в 2 раза (160мм). Пористое покрытие, установленное в области локального максимума возмущений, эффективно снижает пульсации давления, в частности, на поверхности пластины с пористым покрытием длиной 160мм до 95%.

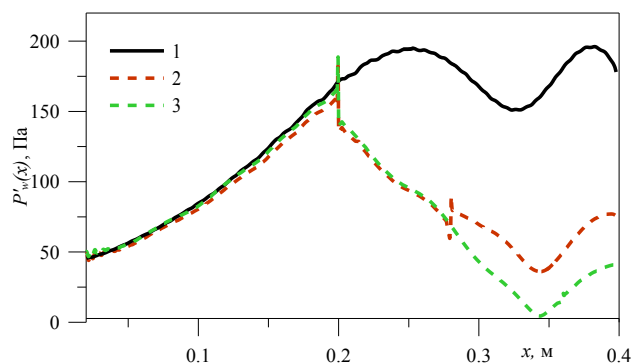


Рис.5. Среднеквадратичные пульсации давления: (1) – на поверхности сплошной пластины, (2) – на пластине с покрытием, (3) – на пластине с покрытием IV; при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160\text{кГц}$ и амплитудой $A=0.03$ (условия 1 таблицы, $L=400\text{мм}$)

Ранее было показано, что с ростом угла атаки интенсивность

возмущений увеличивается, и на поверхности пластины наблюдаются области локальных максимумов и минимумов среднеквадратичных пульсаций давления. Представляет интерес исследование влияния угла атаки на эффективность метода звукопоглощающих покрытий.

На рис. 6 представлены результаты расчетов по подавлению возмущений пористыми покрытиями на поверхности пластины под разными углами атаки $\alpha=5\div 15^\circ$ при разных вариантах расположения пористых звукопоглощающих вставок. Видно, что звукопоглощающие покрытия оказывают сильное влияние как на интенсивность возмущений в зоне расположения покрытия, так и на характер пульсаций вниз по потоку от зоны расположения покрытий, которое по-разному проявляется в зависимости от угла атаки и зоны расположения покрытия. В целом пористые покрытия при всех углах атаки значительно подавляют пульсации давления.

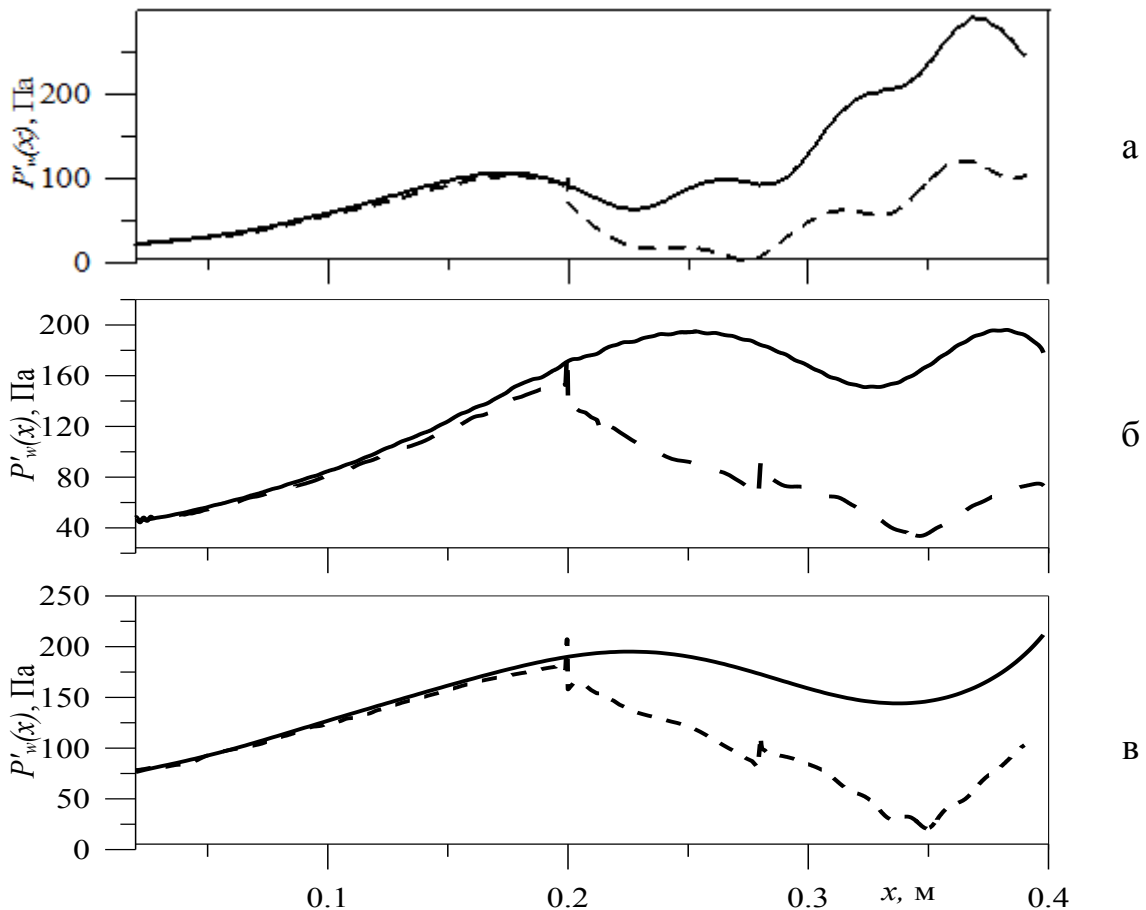


Рис.5. Среднеквадратичные пульсации давления при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160\text{кГц}$ и амплитудой $A=0.03$ (условия 1 таблицы, $L=400\text{мм}$): (сплошная линия) – на поверхности сплошной пластины, (прерывистая линия) – на пластине с покрытием: (а) – $\alpha=5^\circ$, (б) – $\alpha=10.2^\circ$, (в) – $\alpha=15^\circ$

В ходе работы для гиперзвуковых ударных слоев получены данные по динамике развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим высокопористым покрытием, обтекаемой гиперзвуковым потоком колебательно возбужденной смеси углекислого газа и азота, при разных:

- углах атаки;
- концентрациях CO_2 ;
- частотах внешней акустической волны;
- параметрах пористого покрытия (глубина, ширина, расположение на пластине).

Показано, что звукопоглощающее покрытие модели снижает пульсации давления на поверхности (до 90%). Наиболее эффективными являются вставки, расположенные в области локального максимума или нарастания возмущений, а с увеличением длины пористой зоны подавление возмущений значительно усиливается.

Метод пористых звукопоглощающих покрытий эффективно работает для подавления пульсаций при обтекании тел колебательно возбужденными газами.

1. **S. V. Kirilovskiy, A. A. Maslov, T. V. Poplavskaya, I. S. Tsyryul'nikov** Influence of Vibrational Relaxation on Perturbations in a Shock Layer on a Plate // *Technical Physics*. 2015. Vol. 60. No. 5. P. 645–655
2. **Fedorov A., Shplyuk A., Maslov A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonic absorptive coatings // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 479. P. 99–130

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Для выполнения данного исследования необходимо большое количество параметрических расчётов. Использование кластера НГУ существенно ускорило их проведение, а, следовательно, и получение научных результатов.

Публикации:

- А. И. Решетова, С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская, Влияние колебательной релаксации на гиперзвуковое обтекание пластины смесью газов // Тезисы докладов XXIV Всероссийского семинара с международным участием / под ред. В.М. Фомина, В.И. Запрягаева, Новосибирск, 11-13 ноября 2015. (стр. 135)
- А. И. Решетова, О влиянии угла атаки на интенсивность возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов // Тезисы докладов 54-ой Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 16-20 апреля 2016г, стр 56
- A.I. Reshetova, T.V. Poplavskaya, Evolution of disturbances in the shock layer on a flat plate in a flow of a mixture of vibrationally excited gases *International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, 27.06- 3.07 2016, Perm, Russia: Abstracts. Pt II, p. 179

- Reshetova A.I., Poplavskaya T.V. Evolution of disturbances in the shock layer on a flat plate in a flow of a mixture of vibrationally excited gases //AIP Conf. Proc. Vol.1770, 30059 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964001>
- А. И. Решетова, Т. В. Поплавская, Численное моделирование развития возмущений в гиперзвуковом потоке смеси колебательно возбужденных газов // Материалы XX Всероссийской научной конференции с международным участием "Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии", 21-23 сентября, 2016, Томск/Рос.фонд фундам. исслед. ; Том. гос. ун-т, Мех.-мат. фак.; под ред. Д.П. Касымова. - Томск: Томский государственный университет, 2016. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manadger/Repository/vtls:000548592> (стр. 156-158)
- А. И. Решетова, С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская, Численное моделирование развития возмущений в течении колебательно возбужденных газов на пластине // Материалы XVII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 30 октября - 3 ноября 2016г. - Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2016. - стр. 61
- А. И. Решетова, Управление возмущениями течения на пластине в потоке смеси колебательно-возбужденных газов // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ // Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. проф. Б.Ю. Лемешко, проф. А.А. Попова, проф. М.Э. Рояка, доц. В.С. Тимофеева. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - Часть 2. - стр. 137-138
- А. И. Решетова, Т. В. Поплавская, Влияние звукопоглощающих покрытий поверхностей на интенсивность возмущений в потоке смеси колебательно-возбужденных газов // Тезисы докладов XV Всероссийской школы-семинара по аэродинамике и динамике полёта летательных аппаратов (СибНИА), 1-4 марта 2017г
- А. И. Решетова, Т. В. Поплавская, Численное моделирование развития возмущений в течении смеси колебательно возбужденных газов на пластине со звукопоглощающим покрытием // Тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых 20-23 марта 2017г., Новосибирск – Шерегеш
- Решетова А.И., Поплавская Т.В. Численное исследование развития возмущений на пластине в гиперзвуковом потоке смеси колебательно-возбужденных газов // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, No 2. С. 11–19.
- А. И. Решетова, Влияние звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений на пластине в потоке смеси колебательно-возбужденных газов. // Тезисы докладов 55-ой Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 16-20 апреля 2017г. стр. 63
- А.И. Решетова, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, И.С. Цырюльников, Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов, 4-8 сентября 2017г. стр. 223