

## **Тема работы:**

Моделирование неравновесных гиперзвуковых течений на основе континуального подхода

## **Состав коллектива:**

- к.ф.-м.н. Шоев Г.В., научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН
- к.ф.-м.н. Бондарь Е.А., заведующий Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН
- к.ф.-м.н. Бондарь Е.А., научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН
- к.ф.-м.н. Шершнев А.А., научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН

## **Финансовая поддержка:**

Российский Научный Фонд (РНФ). Проект «Моделирование неравновесных гиперзвуковых течений на основе континуального и кинетического подходов», No. 15-19-30016, 2015 — 2017. Руководитель: проф. Е.В. Кустова (Санкт-Петербургский государственный университет).

## **1. Постановка задачи.**

За сильными ударными волнами, возникающими около летательных аппаратов, например, входящих в атмосферу Земли, протекают различные физические процессы. Происходит возбуждение колебательной моды молекул, диссоциация, ионизация, каталитическая активность на поверхности, перенос тепла за счет излучения и др. Корректное математическое описание этих процессов обеспечивает точное и надежное предсказание поверхностных характеристик, в частности, тепловых нагрузок, необходимых для проектирования систем теплозащиты возвращаемых космических аппаратов.

Целью численного исследования, проведенного на суперкомпьютере НГУ, являлась валидация классических и современных моделей диссоциации и колебательной релаксации двухатомных молекул (кислород и азот).

## **2. Современное состояние проблемы.**

Современные методы численного моделирования гиперзвуковых течений около возвращаемых аппаратов учитывают многие физические явления, происходящие в потоке. Одними из ключевых процессов, значительно влияющими структуру потока и поверхностные характеристики, являются поступательно-колебательный энергообмен и диссоциация (колебательно-диссоциативное взаимодействие). В связи с бурным развитием вычислительной техники, в последнее время большое внимание уделяется валидации математических моделей описания данных процессов.

К настоящему моменту, для описания колебательно-диссоциативного взаимодействия можно выделить два типа математических моделей: полу-эмпирические и строгие самосогласованные теоретически обоснованные модели, фактически, полученные из первых принципов. Применение полу-эмпирических моделей оправдано для диапазона параметров, в которых эти модели были

получены, но их точность вне этого диапазона, во многих случаях, неясна. Применение теоретически обоснованных моделей является более трудоемкой задачей с точки зрения реализации этих моделей, а их точность также зависит от используемых входных параметров. Поэтому понимание точности всех моделей является актуальной задачей и принципиально необходимой особенно на первых этапах проектирования возвращаемых космических аппаратов (как дешевая альтернатива дорогостоящим экспериментальным испытаниям). В настоящей работе основное внимание было уделено валидации этих моделей колебательно-диссоциативное взаимодействие сравнением с доступными в литературе экспериментальными данными.

### **3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.**

Рассматривается течение молекулярного азота около конуса с юбкой и бинарной смеси  $N_2/N$  около двойного клина. Параметры набегающего потока для течения около конуса с юбкой даны в Табл. 1 (из [1]) и для течения около двойного конуса в Табл. 2 (из [1]). Течение около конуса с юбкой рассматривалось для случая с нулевым углом атаки. В случае двойного клина рассматривалось три случая с различными углами атаки. Параметры набегающего потока соответствуют экспериментальным условиям [2] для конуса с юбкой и [3] для двойного клина.

Численное моделирование проводилось на основе уравнений Навье—Стокса в двухтемпературном приближении с использованием двух различных моделей (см. [1]) колебательно-диссоциативного взаимодействия. В расчетах предполагается, что поступательная и вращательная моды находятся в термическом равновесии, т.е. поступательная и вращательная температуры совпадают. Колебательная мода молекулярного сорта в общем случае находится в неравновесном состоянии, т.е. колебательная температура молекулярного сорта отлична от поступательно-вращательной температуры и находится из численного решения уравнения, описывающего закон сохранения энергии колебательной моды. Численное решение уравнений Навье—Стокса проводится с использованием программного пакета ANSYS Fluent и дополняется пользовательскими функциями, позволяющими моделировать колебательно-диссоциативное взаимодействие.

Расчетные области, использованные в настоящей работе, представлены на рис.1а для конуса с юбкой и рис.1б для двойного клина. На левой входной границе (inlet) задавались параметры набегающего потока. На правой выходной (outlet) границе использовалась экстраполяция всех неизвестных из расчетной области. Стенка (cone walls/wedge walls) считалась изотермической при температуре 300 К и на ней задавалось условие прилипания, нулевое значение градиента давления и диффузионного потока (для случая с двойным клином). Течение около конуса с юбкой считалось осе-симметричным, поэтому на нижней границе (axis) ставилось граничное условие оси симметрии. Течение около двойного клина считалось плоским, поэтому на нижней границе ставилось условие симметрии для случая 1049, а для остальных условий задавалась экстраполяция всех неизвестных из расчетной области.

Расчеты проводились с использованием структурированной четырехугольной сетки со сгущением к поверхности обтекаемого тела. После получения численного решения на этой сетке проводилась адаптация сетки делением каждой ячейки на две в каждом направлении на ударной волне и за ней до тела. Эта процедура повторялась до достижения сходимости численного решения на последовательности измельчающихся сеток.

#### 4. Полученные результаты.

Сравнение результатов численного моделирования с различными моделями VT-обмена и экспериментальными данными [2] показаны на рис. 2 в виде распределения давления и теплового потока по поверхности конуса. Результаты расчетов по различным моделям дают хорошее совпадение между собой и экспериментальными измерениями. Для оценки влияния возбужденной колебательной моды проведен расчет, в котором колебания полностью заморожены (кривая "no vibrations"). Видно, что колебательная релаксация газа не оказывает влияния на распределение давления по поверхности конуса (рис. 2a). На рис. 2b наблюдается хорошее совпадение распределений теплового потока для результатов расчетов по неравновесным моделям с экспериментом. Результаты расчета с полностью замороженной колебательной модой показывают заниженные значения теплового потока, однако отличие не превышает 9%. Причиной этого является медленная релаксация газа за отошедшей ударной волной вследствие низкой поступательно-вращательной температуры за ней, поэтому колебательная мода практически заморожена. Это позволяет сделать вывод о незначительном вкладе колебательной неравновесности в изменение характеристик на поверхности двойного конуса для данных начальных условий и условий на стенке.

Тепловые потоки на поверхность двойного клина, рассчитанные с использованием различных моделей, представлены на рис. 3 для трех начальных условий в набегающем потоке. Также на рисунке показаны экспериментальные данные [3] и результаты расчетов [4]. Хорошо видно, что результаты всех расчетов качественно совпадают с экспериментальными измерениями, но отметим, что численные расчеты в целом недооценивают величину теплового потока. Различия между численными данными вызваны использованием разных моделей колебательно-диссоциативного взаимодействия. Кроме основного пика теплового потока на распределениях наблюдается множество локальных максимумов и минимумов теплового потока, обусловленные структурой вихрей в зоне отрыва потока.

Более подробный анализ представлен в [1].

## 5. Иллюстрации, визуализация результатов.

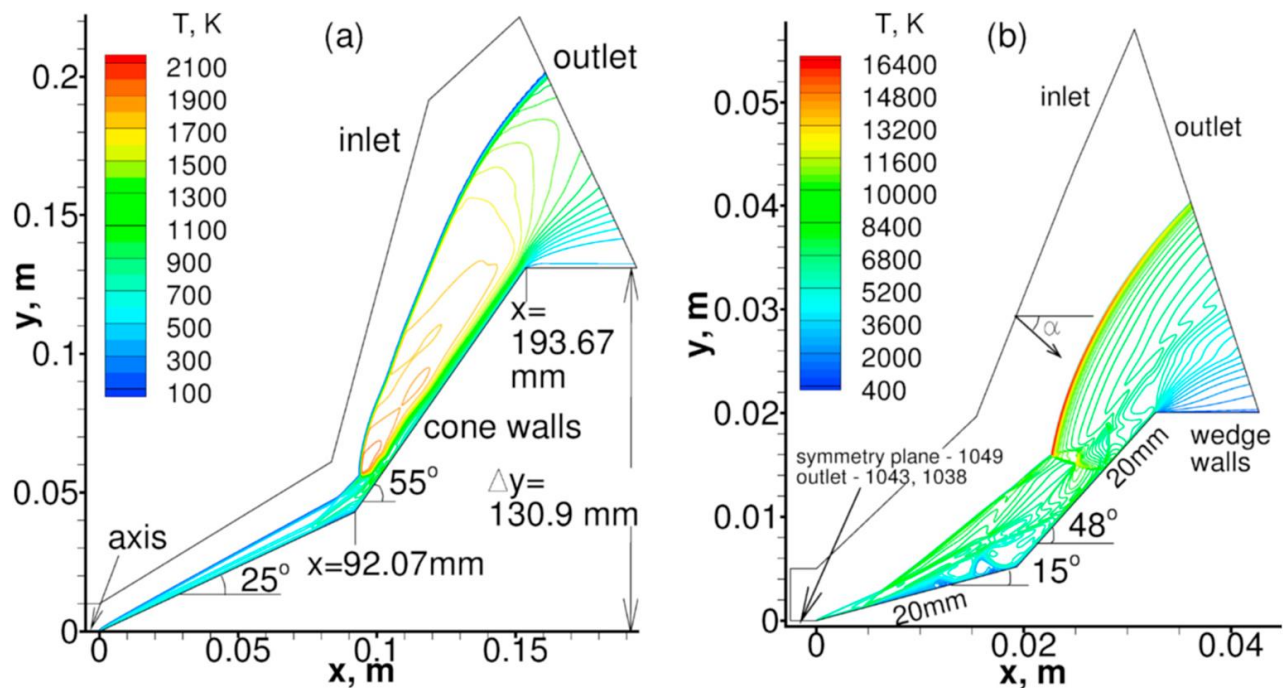


Рис. 1. Расчетные области и изолинии поступательно-вращательной температуры.

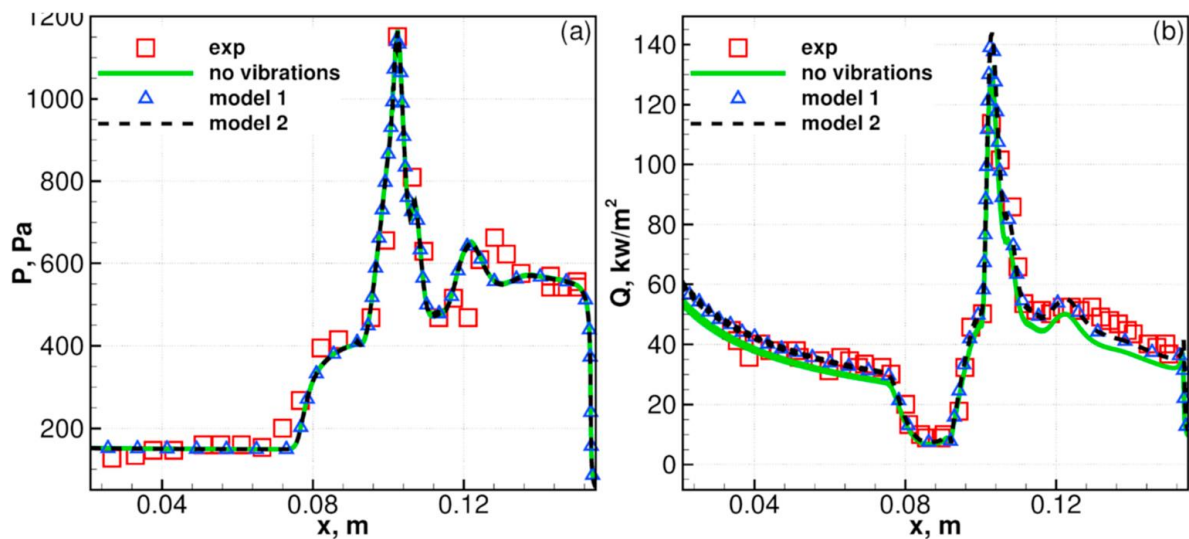


Рис. 2. Распределения давления и теплового потока на поверхности двойного конуса в сравнении с экспериментальными измерениями.

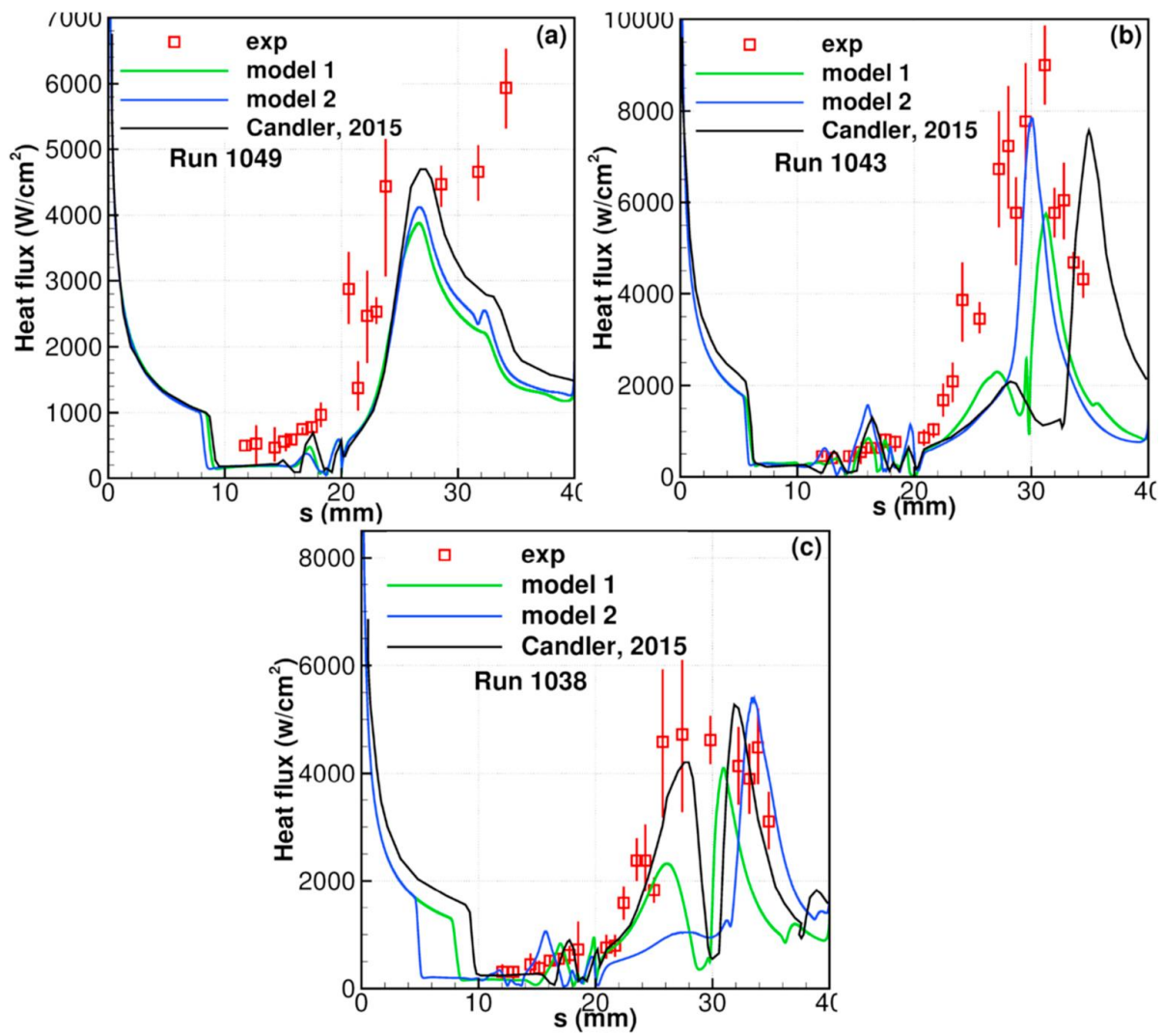


Рис. 3. распределение теплового потока по поверхности двойного клина в сравнении с экспериментальными измерениями из численными данными [4].

## **Список используемой литературы.**

[1] G. Shoev, G. Oblapenko, O. Kunova, M. Mekhonoshina, E. Kustova, Validation of vibration-dissociation coupling models in hypersonic non-equilibrium separated flows, *Acta Astronautica*, Available online 21 December 2017, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.023>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517312985>).

[2] J. Moss, G. Bird, DSMC Simulations of Hypersonic Flows With Shock Interactions and Validation With Experiments, 37th AIAA Thermophysics Conference, 28 June–1 July, 2004 Portland, OR, AIAA Paper 2004–2585.

[3] J. Olejniczak, G. Candler, M. Wright, I. Leyva, H. Hornung Experimental and computational study of high enthalpy double-wedge flows *J. Thermophys. Heat Tran.*, 13 (4) (1999), pp. 431–440.

[4] G. Candler . Rate-dependent energetic processes in hypersonic flows . *Prog. Aero. Sci.*, 72 (2015), pp. 37–48 celebrating 60 Years of the Air Force Office of Scientific Research (AFOSR): A Review of Hypersonic Aerothermodynamics

## **Эффект от использования кластера в достижении целей работы.**

Использование кластера НГУ помогло провести необходимые расчеты с использованием установленного на нем программного и аппаратного обеспечения. Эффект от использования кластера в достижении целей работы значительный.

## **Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Если имеется, указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).**

[1] G. Shoev, G. Oblapenko, O. Kunova, M. Mekhonoshina, E. Kustova, Validation of vibration-dissociation coupling models in hypersonic non-equilibrium separated flows, *Acta Astronautica*, Available online 21 December 2017, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.023>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517312985>).  
Web of Science, SCOPUS, РИНЦ, Q1  
(<http://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=12372&tip=sid>)  
Импакт-фактор: 1.536

[2] 10. G. Shoev, Ye. Bondar. Numerical study of non-equilibrium gas flows with shock waves by using the Navier–Stokes equations in the two-temperature approximation // *AIP Conference Proceedings* 1770, 040007 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4964076>  
Web of Science, SCOPUS, РИНЦ