

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДИНАМИКЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

Приведен краткий обзор основных результатов фундаментальных и прикладных исследований, полученных коллективом сотрудников отдела «Динамика разреженного газа» Института технической механики НАН Украины и НКА Украины за период ~ 40 лет. Акцент сделан на результаты, полученные в последнее десятилетие.

The main results of fundamental and applied research carried out by research team of the Rarified Gas Dynamics Department of the Institute of Technical Mechanics, NASU&NSAU for about 40 years are briefly reviewed. The accent is made on the results obtained last decade.

Работы в области динамики разреженного газа и молекулярной газовой динамики были начаты в Институте технической механики НАН и НКА Украины в конце 60-х годов минувшего столетия при инициативной поддержке Главного конструктора КБ-3 (КБ «Южное») члена-корреспондента АН УССР и АН СССР Вячеслава Михайловича Ковтуненко. В то время он возглавлял на общественных началах молодой коллектив отдела аэрогазодинамики Днепропетровского отделения института механики АН УССР, впоследствии преобразованного в Институт технической механики АН УССР (ИТМ АН УССР).

Работы в этой области были востребованы в связи с бурным развитием ракетно-космической техники и космических исследований в верхних слоях атмосферы Земли и планет Солнечной системы. Основная направленность исследований была связана с необходимостью аэрогазодинамического сопровождения проектно-конструкторских разработок КБ «Южное» в области создания космических аппаратов (КА) различного назначения. Впоследствии на базе отдела аэрогазодинамики было создано три отдела аэрогазодинамического и плазмогазодинамического направления, одним из которых является отдел «Динамика разреженного газа». Тематика отдела, ее фундаментальная и прикладная направленность с первых же дней формировалась и координировалась в непосредственном контакте с ведущими научными и производственными коллективами страны. В первую очередь с такими организациями, как: КБ «Южное», ЦНИИМаш, ЦАГИ им. проф. Н.Е.Жуковского, НПО «Энергия», НПО им. С.А.Лавочкина, НПО «Молния», ЦСКБ, ВЦ АН СССР, Институт астрономии АН СССР, Московский авиационный институт, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Ленинградский государственный университет, Институт теоретической и прикладной механики СО АН СССР, Институт теплофизики СО АН СССР, НИИ – ВЦ «Космос» и рядом других организаций.

Коллектив отдела постоянно принимал участие в работах международных и всесоюзных конференций по динамике разреженного газа, был инициатором проведения в ИТМ АН УССР трех межведомственных конференций по прикладным вопросам аэрогазодинамики.

Ретроспективный анализ работ и полученных при этом результатов коллектива отдела за период ~ 40 лет можно найти в обзорных статьях [1 – 3], а также в недавно опубликованной монографии [4] (рис. 1).

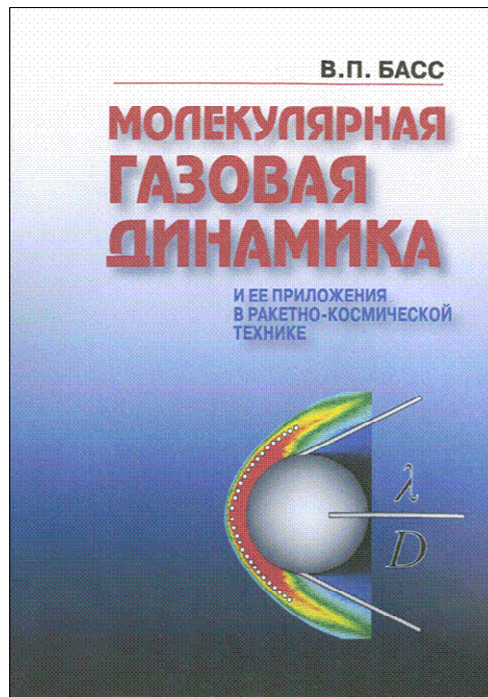


Рис. 1

Начиная с первых же дней освоения космического пространства молекулярно-кинетическая теория стала тем основным фундаментом, на базе которого были определены законы обтекания КА потоком разреженного газа и изучены различные физические процессы в их окрестности. Методы динамики разреженного газа и молекулярной газовой динамики нашли ряд современных приложений при разработке и эксплуатации объектов ракетно-космической техники. Тематика отдела охватывает следующие основные направления:

- разработка и создание численных методов, алгоритмов и программных средств для проведения исследований аэродинамических, тепловых, фотометрических характеристик и процессов массопереноса в окрестности орбитальных и спускаемых КА;
- лабораторное моделирование условий полета, экспериментальные исследования особенностей взаимодействия сверхзвуковых нейтральных потоков разреженного газа с обтекаемыми поверхностями, проведение комплексных испытаний и калибровка бортовых измерительных систем и аппаратуры;
- разработка концепций, постановка и реализация космических научных и прикладных экспериментов.

Численное моделирование обтекания КА сложной формы в свободномолекулярном режиме является традиционно одним из основных тематических направлений коллектива отдела. На протяжении ряда лет получены новые результаты по обобщению и совершенствованию предложенного полурегулярного метода, сочетающего основные преимущества методов прямого статистического моделирования, теории "локального взаимодействия" и регулярных методов решения задач внешнего обтекания КА. Приоритетное внимание уделено построению эффективных численных алгоритмов учета эф-

фактов интерференции, взаимного затенения элементов конструкции и их программной реализации, позволивших проводить многопараметрические исследования аэродинамических характеристик КА различного назначения.

Разработаны новые математические модели, построены эффективные алгоритмы и создано программное обеспечение для описания процессов массопереноса в окрестности КА, включая расчет трехмерных свободномолекулярных полей течений с учетом взаимодействия струй двигательных установок с элементами конструкций.

Большая часть разработанных методов вошла в состав первого в СССР "Руководства для конструкторов по аэродинамике и теплообмену изделий ракетно-космической техники в верхних слоях атмосферы Земли", созданного в 1982 году вместе с представителями ведущих научно-исследовательских и проектных организаций (ЦНИИМаш, ЦАГИ им. проф. Н.Е.Жуковского, НПО "Энергия", КБ "Южное", ЦКБМ и др.).

В отделе был решен комплекс вопросов, связанных с разработкой и созданием эффективных методов математического моделирования внешних тепловых потоков к поверхностям КА, движущихся на больших высотах.

В контексте современных требований к системам обеспечения тепловых режимов КА выделены: прямые потоки солнечного излучения, тепловое воздействие струй двигательных установок, молекулярные тепловые потоки ("кинетический" нагрев и нагрев в результате рекомбинации атомарного кислорода верхней атмосферы на обтекаемых поверхностях), а также уходящие от Земли радиационные потоки. Показано, что на малых высотах (~200 – 300 км) над поверхностью Земли молекулярные потоки вносят существенный вклад в суммарные тепловые потоки на элементы конструкции КА больших размеров (орбитальные комплексы, аппараты многоразового использования и т.д.). Величины этих потоков в существенной мере зависят от молекулярного состава верхней атмосферы Земли и его вариаций, обусловленных солнечной и геомагнитной активностью. Подчеркивается, что при разработке систем терморегулирования КА необходимо учитывать все виды внешних радиационных потоков.

В 1988 г. при непосредственной финансовой поддержке НПО "Энергия" и КБ "Южное" была введена в эксплуатацию вакуумная аэродинамическая установка (ВАУ-2М) с системой криогенной откачки [4]. На данной установке получен ряд уникальных результатов по определению коэффициентов обмена импульсом и индикатрис рассеяния сверхзвуковых нейтральных потоков со скоростями 6 – 9 км/с на основных конструкционных материалах покрытий КА (сплав АМГ-6, экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), внешнее покрытие солнечных батарей, эмаль АК-12). Результаты силовых измерений обобщены в рамках гиперзвукового приближения диффузной модели с переменными коэффициентами аккомодации нормальной P_n и тангенциальной P_t составляющих импульса. Среднеквадратичная погрешность измерений не превышала 6%. Полученные результаты согласуются с результатами измерений индикатрисы рассеяния потоков массы на тех же поверхностях.

Выявленные в ходе численных и лабораторных исследований особенности взаимодействия сверхзвуковых потоков низкой плотности с плоскими мишенями, изготовленными из указанных конструкционных материалов, в полной мере проявляются в силовых измерениях на сферических, конических и других моделях. Показано, что наличие квазизеркальной составляющей

импульса приводит к изменению коэффициента C_x сферы от значения $\sim 1,9$ для покрытий из АМГ-6 до значения $\sim 2,0 - 2,1$ для покрытий из АКА-12 и ЭВТИ, соответственно.

Полученные результаты послужили основанием для проведения натурного космического эксперимента "Вариация" в рамках работ по созданию и эксплуатации пассивных эталонных искусственных спутников Земли (ИСЗ) серии "ПИОН". Суть этих предложений заключалась в одновременном запуске на одну и ту же орбиту трех пар сферических ИСЗ одинаковых размеров и массы, но покрытых различными конструкционными материалами. Привлечение существующих средств контроля космического пространства для получения информации об эволюции параметров орбит позволило исключить плотность атмосферы из обрабатываемой информации и установить прямое расхождение в коэффициентах сопротивления этих спутников. Калибровочные значения коэффициентов лобового сопротивления моделей спутников "ПИОН" были измерены в вакуумной аэродинамической установке ВАУ-2М до их запуска. Качественное и количественное совпадение результатов обработки трубных и натуральных экспериментов позволило сделать вывод о достаточно адекватном моделировании основных физических особенностей взаимодействия высокоскоростных потоков разреженного газа с основными конструкционными материалами внешних покрытий ИСЗ в установке ВАУ-2М и их пересчете на натурные условия полета.

Среди основных научных результатов последнего десятилетия можно выделить работы, связанные с разработкой и созданием новых численных алгоритмов реализации метода Монте-Карло ("метода пробных частиц"), решения уравнения Больцмана при обтекании тел различной формы в широком диапазоне расчетных параметров. Особенности построения расчетных алгоритмов, их сходимость для различных чисел Кнудсена и результаты сравнений с имеющимися численными и экспериментальными данными докладывались на ежегодных международных школах-семинарах "Модели и методы аэродинамики" [5–9], а также опубликованы в работах [10 – 19].

Работоспособность предложенных алгоритмов продемонстрирована в [11] на примере обтекания сферы в переходном режиме обтекания путем сравнения с экспериментальными данными. Представлены результаты численных исследований аэродинамических характеристик 2-й и 3-й ступеней ракетносителя космического ракетного комплекса "Циклон-4" на начальных участках входа в плотные слои атмосферы Земли.

В работе [10] приведены результаты численных исследований гиперзвукового обтекания 70-и градусного затупленного конуса и их сравнение с последними экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе SR3 французского Национального научно-исследовательского центра. Эксперименты были выполнены специально для создания первичной базы данных и апробации различных расчетных методов в динамике разреженного газа. Были измерены основные аэрогазодинамические характеристики – интегральные (аэродинамические силы) и локальные (поля плотности, тепловые потоки по всей поверхности модели).

Многопараметрические численные исследования процесса формирования ударной волны в окрестности теплоизолированного цилиндра, обтекаемого сверхзвуковым потоком аргона ($M_\infty = 5,48$) при числах Кнудсена, изменяющихся в диапазоне значений $1,0 \div 0,02$, продемонстрированы в работе [12].

Полученные результаты сравнивались с расчетами других авторов по методу Берда и асимптотическими значениями. Показано, что с применением разработанной адаптивной расчетной (статистической) сетки в поле течения достигается хорошее количественное и качественное совпадение результатов, полученных разными методами. Использование адаптивной сетки в свободномолекулярном и переходном режимах обтекания позволяет существенно экономить расчетное время и автоматически выходить на соответствующий данному режиму обтекания размер статистической ячейки в различных зонах расчетной области. Залогом успеха в этих исследованиях явилось использование в расчетах значения эффективного сечения рассеяния для аргона, впервые полученного в экспериментах на вакуумной аэродинамической установке ВАУ-2М для тех же энергий межмолекулярного взаимодействия, что и в расчетах.

Сравнение результатов математического моделирования гиперзвукового обтекания плоской пластины, расположенной под нулевым углом атаки, представлено в работе [13]. Сравниваются решения полных уравнений Навье-Стокса с результатами решения уравнения Больцмана статистическими методами. Анализ представленных данных показывает, что степень согласия результатов счета, выполненных различными методами, различна. Имеются некоторые количественные различия в расчетных характеристиках при достаточно адекватном качественном их поведении, в первую очередь при выходе на асимптотические значения. Что же касается сравнения результатов расчетов, выполненных с помощью кинетических методов и на базе уравнений Навье-Стокса для описания течений разреженного газа, то лучшее согласование наблюдается при меньших градиентах газодинамических величин в поле течения и по мере удаления от передней кромки пластины. При сопоставлении газодинамических параметров необходимо иметь в виду, что для уравнений Навье-Стокса граничные условия определены как некоторые фиктивные значения на стенке, обеспечивающие вне кнудсеновского слоя совпадение решений Навье-Стоксовых уравнений с решением уравнения Больцмана с истинными условиями на границе. Другими словами, сопоставляются “истинные” значения параметров газа, полученные в результате решения уравнения Больцмана методами Монте-Карло, и некоторые “фиктивные” значения, определяемые из решения сплошнородных уравнений, которые в общем случае могут и не совпадать. Тем не менее, по мере удаления от передней кромки имеется хорошее количественное согласование параметров, полученных этими методами. Применение уравнений Навье-Стокса для описания течений разреженного газа требует обоснования в каждом конкретном случае, поскольку область их применимости определяется асимптотически при числах Кнудсена $Kn_\infty \rightarrow 0$ и предполагается малое отклонение функции распределения от локально равновесной.

В работе [15] приведены результаты численных исследований поперечного обтекания пластины сверхзвуковым потоком разреженного газа для больших и малых чисел Маха в широком диапазоне чисел Кнудсена. Получены значения коэффициента лобового сопротивления и распределение макропараметров течения в окрестности пластины, учитывая и донную область. Приведено сравнение полученных результатов с данными других авторов. Показано преимущество метода пробных частиц в сходимости результатов счета и затратах машинного времени.

Особое внимание в последнее время было уделено разработке расчетных алгоритмов и созданию программных средств для аэробаллистического обеспечения проектных и конструкторских разработок КА (программное обеспечение "Интерполяция-1"). Актуальность этих работ связана с повышением современных требований к разработке и эксплуатации КА нового поколения. Современные КА имеют сложную геометрическую форму, которая, с точки зрения аэродинамики, приводит к решению задач трехмерного обтекания со значительным количеством расчетных параметров (высота орбиты, состав и динамика параметров верхней атмосферы, особенности взаимодействия ее отдельных компонентов с конструкционными материалами внешних покрытий и так далее). Вследствие этого специалисты в области динамики и баллистики при использовании расчетов аэродинамических характеристик вынуждены обращаться к большим массивам табличных данных, что приводит к значительным ресурсным затратам на этапе эскизных и проектных разработок КА.

Среди работ последних лет необходимо особо выделить участие коллектива отдела в подготовке и выпуске 8-го научно-информационного 2-х томного издания "Модель космоса" [17]. Оно было приурочено к 50-летней годовщине запуска первого ИСЗ (рис. 2). В первом томе описываются физические условия в космическом пространстве. Второй том посвящен рассмотрению влияния факторов космического пространства на материалы и оборудование КА. В [18] кратко изложено общее содержание «Модели космоса». Основное внимание уделено газодинамическим аспектам, касающимся двух разделов 2-го тома этого издания:

1.2. «Численное моделирование процессов массопереноса в окрестности КА».

1.3. «Лабораторные и натурные эксперименты по изучению газодинамических процессов в окрестности КА и на их поверхности».

Материалы этих разделов отражают, в основном, результаты, полученные коллективом отдела «Динамика разреженного газа» ИТМ НАН и НКА Украины за последние 15 – 20 лет. Эти исследования посвящены процессам формирования собственной внешней атмосферы (СВА) КА, которые обусловлены газовой выделением с поверхности материалов внешних покрытий, утечками газов из внутренних отсеков КА, работой двигательных установок (ДУ) разных типов и действием некоторых других источников. Плотность СВА непостоянна во времени. В первые дни после запуска КА она сильно возрастает в результате интенсивного обезгаживания материалов внешней поверхности аппарата. Затем наступает динамическое равновесие между процессами поступления частиц в газовое облако, возврата их на поверхность аппарата и рассеяния в окружающее пространство. Однако это равновесие может существенно нарушаться при включении ДУ, операциях шлюзования и т.п. Учет этих возмущений очень важен для обеспечения надежной работы бортовой служебной и научной аппаратуры. На примере КА «Січ-2» в [19] обсуждены проблемы, связанные с защитой оптической системы аппарата при попадании продуктов СВА на входную апертуру телескопа. Проанализировано влияние струй двигательных установок различного назначения на распределение газодинамических параметров в окрестности аппарата при их переотражении от элементов конструкции.

В последнее время опасным глобальным проявлением влияния ракетно-



Рис. 2

космической техники на состояние космической среды является накопление на околоземных орбитах тел различного искусственного происхождения – космического мусора, общая масса которого оценивается приблизительно в 3000 тонн [17]. В докладах [18, 19] обозначены и обсуждены проблемные вопросы построения на базе методов молекулярной газовой динамики новых численных алгоритмов по определению потоков космического мусора на поверхность КА и оценки вероятности пробоя элементов конструкции в результате столкновения с его отдельными фрагментами. Подобного рода вопросы возникли перед коллективом отдела при аэрогазодинамическом сопровождении международного проекта «Венера-Галлей», когда необходимо было решать задачу высокоскоростного взаимодействия (~80 км/с) пылевой составляющей кометной атмосферы с элементами конструкции КА «Вега» [20].

Представленный выше краткий перечень возможных приложений разработанного методологического, алгоритмического и программного обеспечения, а также проведенные с его помощью исследования показывают, сколь мощным и эффективным является аппарат молекулярно-кинетической теории газов, основы которой были заложены Максвеллом и Больцманом более 100 лет назад.

Работы отдела удостоены премии НАН Украины им. М.К.Янгеля (1994 г.) и Государственной премии Украины в области науки и техники (1997 г.)

1. Басс В. П. Применение методов молекулярной газовой динамики в ракетно-космической технике / В. П. Басс // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. – 1998. – Т 1, Вып. 1. – С. 3 – 15.
2. Басс В. П. Результаты численных и экспериментальных исследований в области молекулярной газовой динамики и их приложения / В. П. Басс // Техніческая механіка. – 2001. – № 1. – С. 63 – 85.
3. Басс В. П. Применение методов динамики разреженного газа при разработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники / В. П. Басс // Техніческая механіка. – 2001. – № 2. – С. 52 – 63.

4. *Басс В. П.* Молекулярная газовая динамика и ее приложения в ракетно-космической технике / *В. П. Басс.* – Киев : Наук. думка, 2008. – 272 с.
5. *Абрамовская М. Г.* Об одном алгоритме реализации метода пробных частиц в динамике разреженного газа / *М. Г. Абрамовская, В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Модели и методы аэродинамики : Третья межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2003. – С. 6 – 7.
6. *Басс В. П.* Численные исследования сверхзвуковых течений разреженного газа с помощью метода Монте-Карло / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Модели и методы аэродинамики : Четвертая межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2004. – С. 12 – 13.
7. *Басс В. П.* Решение плоских задач динамики разреженного газа / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Модели и методы аэродинамики : Пятая межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2005. – С. 15 – 16.
8. *Басс В. П.* Численное моделирование сверхзвукового обтекания пары тел, одно из которых расположено в аэродинамическом следе другого / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Модели и методы аэродинамики : Шестая межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2006. – С. 10 – 11.
9. *Басс В. П.* Верификация методов и алгоритмов в аэродинамике в переходной области / *В. П. Басс* // Модели и методы аэродинамики : Седьмая межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2008. – С. 126 – 128.
10. *Басс В. П.* Численное моделирование стационарного осесимметричного обтекания затупленного конуса в переходном режиме обтекания / *В. П. Басс* // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. – 2005. – Т. 1, Вип. 9. – С. 57 – 66.
11. *Басс В. П.* Об одном алгоритме реализации метода Монте-Карло для решения задач динамики разреженного газа / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Техническая механика. – Днепропетровск. – 2006. – №1. – С. 67 – 79.
12. *Басс В. П.* Гиперзвуковое обтекание теплоизолированного цилиндра разреженным газом / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. – 2006. – Т. 1, Вип. 10. – С. 50 – 60.
13. *Басс В. П.* Верификация методов и алгоритмов решения задач аэродинамики переходной области / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Техническая механика. – Днепропетровск. – 2007. – №1. – С. 49 – 61.
14. *Басс В. П.* К расчету свободномолекулярных полей течений / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Техническая механика. – Днепропетровск. – 2008. – № 1. – С. 73 – 82.
15. *Басс В. П.* Расчет двумерных течений разреженного газа при поперечном обтекании плоской пластины течений / *В. П. Басс, Л. Л. Печерица* // Техническая механика. – Днепропетровск. – 2008. – № 1. – С. 83 – 92.
16. *Abramovskaya M. G.* Aerogasdynamic aspects of space missions / *M. G. Abramovskaya, V. P. Bass, N. V. Petrushenko, L. L. Percheritsa* // Space research in Ukraine 2004 - 2006. – Kiev: ISR NASU-NSAU. – 2006. – P. 78 – 86.
17. Модель космоса. Научно-информационное издание в 2 т. / *Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова.* – Москва : КДУ, 2007. – 2014 с.
18. *Басс В. П.* Газодинамические аспекты в “Модели космоса” / *В. П. Басс* // Модели и методы аэродинамики : Восьмая межд. школа-семинар : материалы. – Москва : МЦНМО, 2008. – С. 13 – 14.
19. *Басс В. П.* Физические процессы взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой / *В. П. Басс* // Солнечно-земные связи и космическая погода : Восьмая украинская конференция по космическим исследованиям : тезисы докладов. – Киев, 2008. – С. 65.
20. *Rijov Yu. A.* Aerodynamic Problems of Space Probes in Comet Atmosphere. / *Yu. A. Rijov, V. P. Bass, V. M. Kovtunenکو et. al.* // Rarefied Gas Dynamic: 13 International Symposium on Rarefied Gas Dynamic, 1982, New York and London. – Plenum Press, 1982. – Vol. 1. – P. 503–511.

Институт технической механики НАНУ и НКАУ,
Днепропетровск

Получено 10.09.08,
в окончательном варианте 15.09.08