

УДК 629.7.015.3:533.6.011.8

**В. П. Басс**

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України,  
Дніпропетровськ

**Численные и экспериментальные исследования  
в динамике разреженного газа  
и их приложения в ракетно-космической  
технике**

*Доповідь на конференції 05.09.05*

---

Наведено короткий огляд основних результатів чисельних, експериментальних та натурних досліджень, які виконані колективом відділу динаміки розрідженого газу Інституту технічної механіки Національної академії наук і Національного космічного агентства України за останні 35 років.

---

Методы динамики разреженного газа и молекулярной газовой динамики нашли ряд современных приложений при разработке и эксплуатации объектов ракетно-космической техники. Здесь будет приведен краткий обзор основных результатов численных и экспериментальных исследований, полученных коллективом отдела «Динамика разреженного газа» ИТМ НАН и НКА Украины на протяжении последних 35 лет. 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 космических аппаратов (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.

**Аэрогазодинамика орбитальных и спускаемых КА.** На основе совместного применения регулярных методов, методов Монте-Карло и теории «локального взаимодействия» разработаны новые численные алгоритмы для определения аэрогазодинамических характеристик КА в различных режимах обтекания. Численное моделирование обтекания КА сложной формы в свободномолекулярном режиме является традиционно одним из основных тематических направлений коллектива отдела. Приоритетное внимание уделено построению эффективных численных алгоритмов учета эффектов интерференции, взаимного затенения элементов конструкции и их программной реализации, позволивших проводить многопараметрические исследования аэродинамических характеристик КА различного назначения.

Большая часть разработанных методик вошла в состав первого в СССР «Руководства для конструкторов по аэродинамике и теплообмену изделий РКТ в верхних слоях атмосферы Зем-

ли», созданного в 1982 г. вместе с представителями ведущих научно-исследовательских и проектных организаций (ЦНИИМАШ, ЦАГИ, НПО «Энергия», КБ «Южное», ЦКБМ и др.).

Решен комплекс задач по аэрогазодинамическому обеспечению международного проекта «Венера—Галлей». Впервые в расчетной практике исследованы газодинамические особенности гиперзвукового ( $V \sim 80$  км/с) обтекания орбитального КА «Вега» газопылевым потоком при одновременном воздействии солнечной радиации. Выполненные исследования были использованы при выборе траектории полета КА в коме кометы Галлея, режимов работы систем ориентации и стабилизации, а также для обеспечения тепловой защиты комплекса научной аппаратуры.

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

Выполнены численные, экспериментальные и натурные исследования газового компонента собственной внешней атмосферы КА «Космос-1643» и «Космос-2007», в ходе которых выявлена корреляция ее параметров с вариациями среднего состава верхней атмосферы Земли, обусловленными разницей в гелиофизических условиях функционирования этих аппаратов.

Вариации молекулярного состава верхней атмосферы в результате солнечной и геомагнитной активности приводят к изменению режима обтекания КА. На высотах свыше 500 км над поверхностью Земли режим обтекания изменяется от гиперзвукового до сверхзвукового, что приводит к увеличению коэффициента сопротивления КА с высотой полета. Данное обстоятельство имеет место и при движении КА в атмосферах других планет.

**Экспериментальные исследования.** В 1988 г. при непосредственной финансовой поддержке НПО «Энергия» и КБ «Южное» в отделе была введена в эксплуатацию вакуумная аэродинамическая установка (ВАУ-2М) с системой криогенной откачки (рис. 1), не уступающая по своим параметрам лучшим зарубежным установкам замкнутого типа, работающим по рефри-

Таблица 1. Основные технические параметры вакуумной аэродинамической установки

Параметр	Значение параметра
Объем рабочей камеры	3.0 м <sup>3</sup>
Объем камеры источника	0.5 м <sup>3</sup>
Давление в рабочей камере	0.67...6.7 мПа
Давление в камере источника	6.7...67 мПа
Скорость откачки рабочей камеры	8000 л/с
Скорость откачки камеры источника	6000 л/с
Среднемассовая скорость потока	4...8 км/с
Степень ионизации потока	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>-6</sup>
Расходимость потока	3°
Диаметр ядра в рабочей камере	0.1 м

жераторному циклу. Основные технические параметры установки приведены в табл. 1.

На данной установке получен ряд новых результатов, касающихся:

- измерения эффективных сечений рассеяния атомов и молекул разреженного газа при столкновениях в диапазоне средних энергий взаимодействия (10 эВ);
- статических и динамических испытаний негерметичных отсеков КА, бортовой научной и служебной аппаратуры;
- определения коэффициентов обмена импульсом и индикатрис рассеяния сверхзвуковых нейтральных потоков на основных конструкционных материалах внешних покрытий КА (сплав АМГ-6, экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), фрагмент солнечной батареи, эмаль АК-12).

Эти результаты позволили провести натурные аэродинамические эксперименты с помощью пассивных эталонных ИСЗ ПИОН, отделяемых от КА «Ресурс-Ф». Совместно с ЦСКБ, НТЦ «Наука» (г. Самара), НИИВЦ «Космос» (г. Москва) был реализован космический эксперимент «Вариация». Одновременно на одну и ту же орбиту запускались два сферических ИСЗ примерно одинаковых диаметров 30 см и масс 45—50 кг, но покрытых различными конструкционными материалами (сплав АМГ-6, стеклоткань (Si), нитрозмаль (АКА-12)). Привлечение существующих средств контроля космического пространства для получения информации об изменении периода обращения этих спутников позволило исключить плотность атмосферы из об-

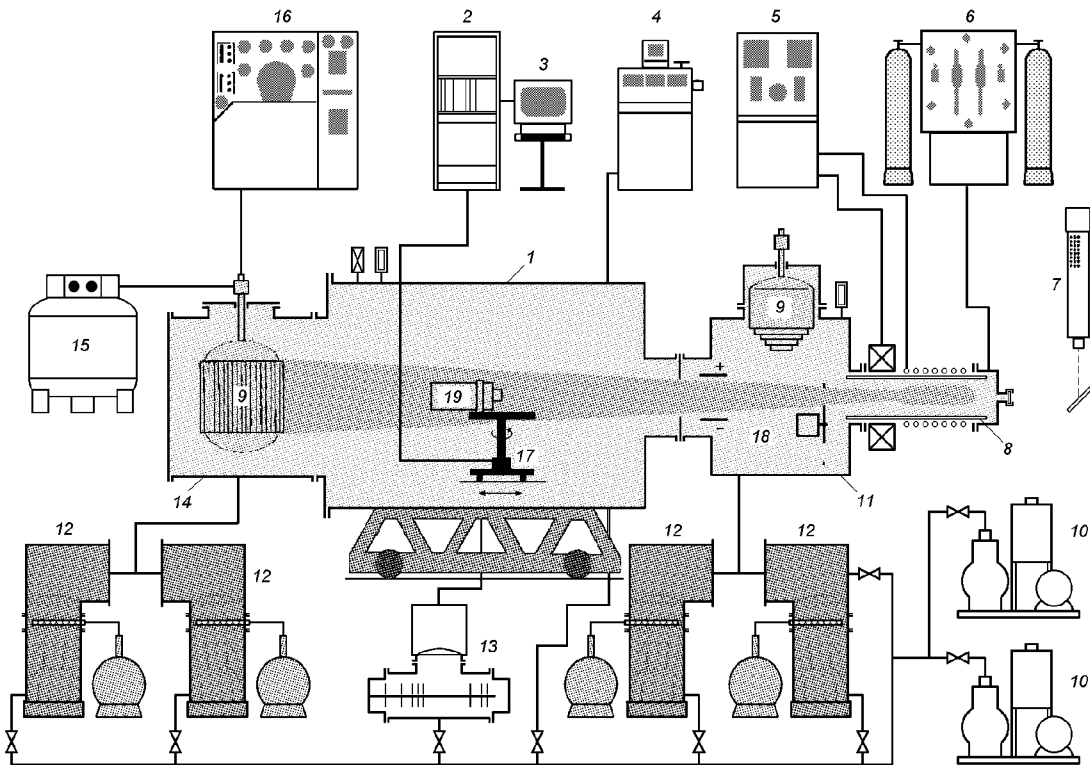


Рис. 1. Вакуумная аэродинамическая установка (ВАУ-2М) с системой криогенной откачки: 1 — рабочая камера; 2, 3 — автоматизированная система измерения и управления экспериментом (КАМАК, ПК IBM); 4 — гелиевый теческатель ПТИ-7; 5 — блок питания плазменного источника; 6 — пульт газоснабжения источника; 7 — лазер газовый ЛГ-75-1; 8 — индукционный плазменный источник; 9 — криогенный вакуумный насос; 10 — форвакуумный насос ВН-6МГ; 11 — камера источника; 12 — высоковакуумный агрегат АВП-8; 13 — турбомолекулярный насос ТМН-200; 14 — вакуумный коллектор; 15 — цистерна с жидким азотом ЦТК-1/0,25; 16 — установка криогенная гелиевая КГУ-150/4,5; 17 — координатное устройство; 18 — модулятор ускоренного потока; 19 — объект исследования

Таблица 2. Результаты натурных и лабораторных экспериментов

Способ получения информации	$C_{X1}/C_{X2}$	$C_{X3}/C_{X4}$	$C_{X6}/C_{X5}$
Лабораторное моделирование	1.045	0.957	1.042
Натурный эксперимент	1.039	0.984	1.035

рабатываемой информации и установить прямое расхождение коэффициентов сопротивления.

Результаты натурных и лабораторных экспериментов приведены в табл. 2.

Одним из перспективных научных направлений отдела является применение надувных трансформируемых пленочных зондов для получения данных о торможении спутников на

малых высотах. Первый эксперимент по трансформированию десятиметрового пленочного зонда был выполнен 18—19 августа 1991 г. с борта КА «Прогресс» при участии космонавтов, работавших в это время на ОК «Мир».

**Приложения молекулярной газовой динамики в космической технике.** Физическая аналогия между процессами молекулярного и радиационного переноса в вакууме позволила также адаптировать разработанное математическое и программное обеспечение применительно к решению актуальных задач космической баллистики, геодинамики, спутниковой фотометрии и лучистого теплообмена. В частности, были выполнены комплексные численные исследования возмущений, действующих со стороны сил негравитационного происхождения на геодинами-

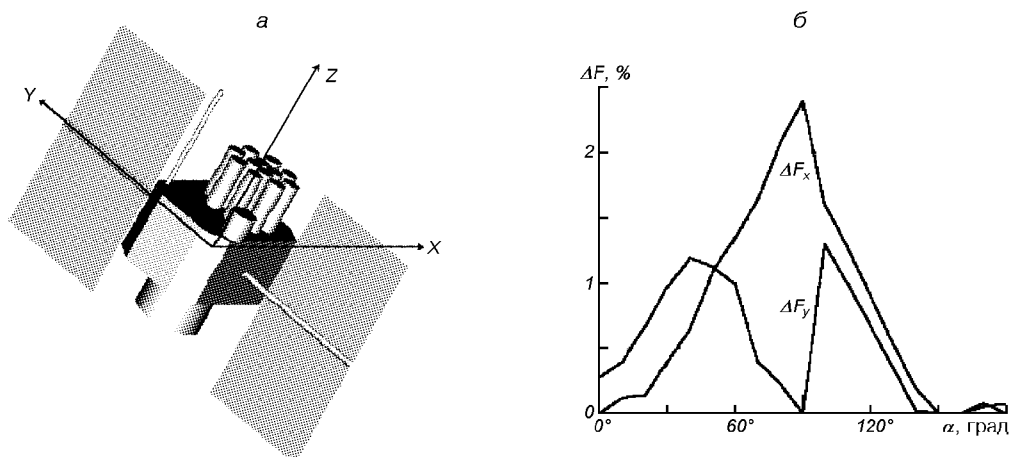


Рис. 2. а — КА GPS «Block II», б — погрешности  $\Delta F_x$  и  $\Delta F_y$  определения сил солнечного давления

ческие спутники и спутники глобальных навигационных систем: «Эталон», ГЛОНАСС, GPS.

К основным задачам, решаемым с помощью спутников глобальных навигационных систем США (GPS) и России (ГЛОНАСС), а также геодинимических ИСЗ (LAGEOS и «Эталон» соответственно), относятся задачи определения параметров вращения Земли (ПВЗ) и обеспечения земной системы координат. При этом предъявляются достаточно высокие требования к математическому и программному обеспечению для обработки орбитальной и наземной информации с целью достижения точности 1 см для координат полюса Земли; 0.1 мс/сут для всемирного времени; 1—3 см для координат наземных пунктов.

Для определения ПВЗ с требуемой точностью движение спутников GPS и ГЛОНАСС по орбите должно моделироваться с точностью 30 см на суточном интервале времени. При этом точность должна оставаться на субметровом уровне при использовании более протяженных дуг — до 30 сут. Из этого следует, что для достижения точности 30 см положения спутника на интервале в 1 сут модель движения должна включать силы, приводящие к ускорению  $10^{-9}$  м/с<sup>2</sup> и более. Таким образом, влияние солнечного давления на спутник должно моделироваться с точностью не хуже 1 %. Для спутников GPS компанией «Рокуэлл Интернешнл» разработаны стандартные модели учета прямого солнечного излучения: ROCK-4 (для спутников типа

«Block I») и ROCK-42 (для спутников типа «Block II»). Эти модели учитывают геометрию спутников, взаимное затенение элементов поверхности.

На рис. 2, б показаны погрешности  $\Delta F_x$  и  $\Delta F_y$  в определении сил солнечного давления, действующих на КА GPS, в проекциях на оси X и Y в зависимости от ориентации на Солнце, обусловленные различиями методик определения взаимного затенения элементов конструкции КА. Разработанная в отделе модель «геометрической оптики» позволяет построить практически точный численный алгоритм учета эффектов затенения. В программе же ROCK-42 взаимное затенение элементов навигационных антенн, а также учет теней, отбрасываемых антеннами на корпус КА, осуществляется приближенно. Как видно из представленного графика, погрешности сил солнечного давления, обусловленные влиянием эффектов взаимного затенения элементов конструкции, являются определяющими для данного класса спутников и могут достигать величины порядка 2.5 %.

Был выполнен численный анализ негравитационных возмущений, действовавших на ИСЗ «Эталон» (рис. 3) с учетом отражательной способности элементов конструкции. В процессе вычислений считалось, что 2140 угольковых световозвращателей равномерно распределены по поверхности спутника, и их суммарная площадь составляет 24 % от его боковой поверхности. В расчетах использовалась также угловая зависи-

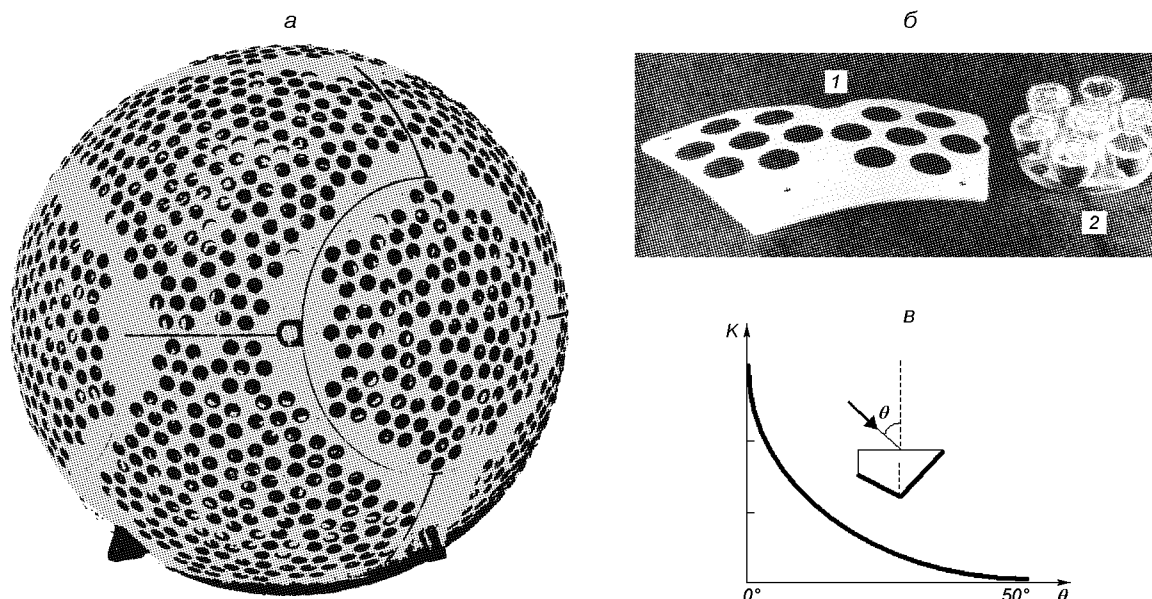


Рис. 3. ИСЗ «Эталон»: *a* — общий вид; *б* — конструктивные элементы внешнего покрытия (1 — светорассеивающая панель, 2 — световозвращающая панель с уголковыми отражателями); *в* — угловая зависимость коэффициента возвращения уголкового отражателя

мость коэффициента обратного отражения  $K(\theta)$  для данного типа световозвращателей. Значения коэффициента нормированы на величину отраженного радиационного потока при нормальном падении солнечных лучей на входную грань световозвращателей ( $\theta = 0$ ). Априорные (предположительные) оценки показали, что значения коэффициента потока импульса солнечных лучей  $C_{Fx}$  на поверхность ИСЗ «Эталон» лежат в пределах  $C_{Fx} = 1.22 \dots 1.28$ . Разброс в третьей значащей цифре коэффициента  $C_{Fx}$  указывает на степень неопределенности отражательной способности световозвращателей при углах падения  $\theta > 60^\circ$ . Первая цифра соответствует расчетам в случае зеркального отражения и полного поглощения для этих углов падения, а вторая — в случае полного диффузного рассеяния. Диапазон значений этого коэффициента в случае зеркальной и диффузной модели отражения для всей сферической поверхности спутника составляет  $C_{Fx} = 1.0 \dots 1.44$ . Апостериорный анализ данных дальнометрии показал, что значения этого коэффициента лежат в пределах  $C_{Fx} = 1.20 \dots 1.23$ . Совпадение расчетных и наблюдаемых коэффициентов можно считать идеальным.

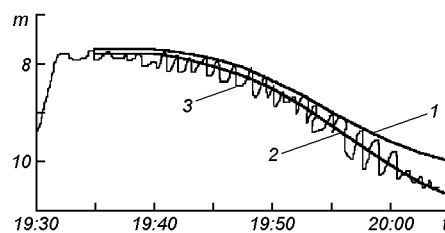


Рис. 4. Кривые блеска для КА типа «Радуга»: 1 — расчеты без учета взаимного затенения элементов конструкции, кривая 2 — с учетом затенения, 3 — наземные наблюдения

Методы вычислительной аэрогазодинамики оказались весьма эффективными для решения широкого круга задач спутниковой фотометрии, а также построения физических и математических моделей свечения КА.

В качестве примера на рис. 4 показано сравнение результатов расчета кривых блеска для КА типа «Радуга» ( $H = 36000$  км) с данными наземных наблюдений (волнистая кривая), выполненных 12.10.1990 г. за период времени с  $19^{\text{h}}30^{\text{m}}$  до  $20^{\text{h}}05^{\text{m}}$ . Кривая 1 соответствует расчетам без учета взаимного затенения элементов конструкции, кривая 2 — с учетом. В процессе движения КА панели СБ периодически подворачивались для соответствующей ориентации на

Солнце, что вызывало их «дрожание». Дрожание батарей с амплитудой  $1^\circ$  хорошо объясняет поведение наблюдаемой кривой блеска.

Разработанный математический аппарат для расчета аэрогазодинамических характеристик был модифицирован применительно к задачам внешнего молекулярного и радиационного теплообмена КА. Среди основных источников внешнего нагрева элементов КА выделены: прямые потоки солнечного излучения, молекулярные тепловые потоки («кинетический» нагрев и нагрев в результате рекомбинации атомарного кислорода верхней атмосферы на обтекаемых поверхностях), а также потоки инфракрасного излучения Земли и отраженные ее поверхностью потоки солнечного излучения.

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

1. Абрамовская М. Г., Аксютенко А. Н., Басс В. П. и др. Экспериментальные исследования в динамике разреженного газа // *Техническая механика*.—2002.—№ 2.—С. 45—57.
2. Басс В. П. Постановка физических и аэрономических экспериментов в космосе // *Техническая механика*.—1999.—№ 1.—С. 94—102.
3. Басс В. П. Результаты численных и экспериментальных исследований в области молекулярной газовой динами-

ки и их приложения // *Техническая механика*.—2001.—№ 1.—С. 63—85.

4. Басс В. П. Применение методов динамики разреженного газа при разработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники // *Техническая механика*.—2001.—№ 2.—С. 52—63.
5. Басс В. П., Петрушенко Н. В., Печерица Л. Л., Тарасов В. Б. Аэрогазодинамическое сопровождение перспективных космических проектов // *Проблемы управления и информатики*.—2004.—№ 6.—С. 41—51.
6. Басс В. П. Модели и методы молекулярной газовой динамики и их применение в ракетно-космической технике // *Техническая механика*.—2005.—№ 2.—С. 106—119.
7. Басс В. П., Печерица Л. Л. Численное моделирование стационарного осесимметричного обтекания затупленного конуса в переходном режиме обтекания // *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Механіка*.—2005.—1, вип. 9.—С. 57—66.

---

#### NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES IN RAREFIED GAS DYNAMICS AND THEIR APPLICATION IN ROCKET-SPACE ENGINEERING

V. P. Bass

We give a brief review of the basic results of the numerical, experimental and full-scale investigations performed in the department of "Rarefied Gas Dynamics" of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences and National Space Agency of Ukraine for the last 35 years.