

ОТДЕЛ МЕХАНИКИ

*В.В. Аристов, С.Я. Степанов**

Общие сведения

Отдел механики создан 1 января 1987 г. на основе объединения самостоятельного сектора теории устойчивости и механики управляемых систем В.В. Румянцева (ТУМУС), сектора кинетической теории газов Е.М. Шахова (КТГ) и сектора асимптотических методов в газовой динамике О.С. Рыжова (АМГД). Возглавил отдел чл.-корр. АН СССР В.В. Румянцев (с 1992 г. академик РАН). В настоящее время отдел механики состоит из двух секторов: ТУМУС и КТГ, сектор АМГД переведен в отдел механики сплошных сред. В 1995 г. обязанности заведующего сектором ТУМУС были возложены на А.В. Карапетяна. В секторе КТГ с 1995 г. по 2004 г. заведующим был Ф.Г. Черемисин и в настоящее время — В.В. Аристов. В 2002 г. заведующим отделом механики был назначен С.Я. Степанов. В.В. Румянцев, являясь советником РАН, продолжал принимать активное участие в работе сектора ТУМУС и отдела механики вплоть до своей кончины 10 июня 2007 г.

Научная работа сектора ТУМУС связана с развитием аналитических и численных методов теоретической механики и теории устойчивости движения и их применением в прикладных задачах. В настоящее время сектор состоит из восьми человек.

Сектор КТГ занят развитием аналитических и численных методов решения уравнения Больцмана, решением задач кинетической теории газов. В секторе семь сотрудников.

Далее остановимся подробнее на научной работе секторов ТУМУС и КТГ. Они имеют самостоятельную историю в ВЦ РАН, более глубокую, чем их история в составе отдела механики.

Сектор теории устойчивости и механики управляемых систем (ТУМУС)

Тематика сектора ТУМУС начала формироваться в 1965 г. после перехода В.В. Румянцева из Института механики АН СССР в ВЦ АН СССР, в лабораторию общей механики и гидродинамики Н.Н. Моисеева, и опубликования монографий Н.Н. Моисеева и В.В. Румянцева [1, 2]. Вокруг В.В. Румянцева образовалась группа, состоящая из его учеников, в основном выпускников аспирантуры механико-математического факультета МГУ. Первыми в этой группе были Р.С. Суликашвили и С.Я. Степанов (с 1966 г.). Впоследствии к ним присоединились В.Н. Рубановский (с 1967 г. по 1991 г.), Ван Дань-чжи (с 1968 г. по 1975 г.), В.С. Сергеев (с 1972 г.). В 1973 г. группа В.В. Румянцева была оформлена как самостоятельное подразделение – лаборатория ТУМУС, которая в 1985 г. была переименована в отдельный самостоятельный сектор ТУМУС. Позже в составе сектора ТУМУС приступили к работе А.В. Карапетян (с 1975 г. по 2006 г.), А.С. Сумбатов (с 1977 г.), А.А. Буров (с 1984 г.), Е.В. Аббарова (с 1994 г. по 1999 г.), А.С. Кулешов (с 1999 г. по 2001 г.), Д.Л. Аббаров (с 1999 г.), Н.Н. Титова (с 2000 г. по 2004 г.), [В.О. Бучин](#) (с 2001 г. по 2011 г.), И.Ф. Кожевников (с 2004 г.), С.В. Хизгияев (с 2005 г. по 2007 г.) и И.И. Косенко (с 2011 г.).

*) Статья была написана к 50-летию Вычислительного центра им. А.А.Дородницына РАН в 2005 г. Скорректирована и дополнена А.С.Сумбатовым в сентябре 2009 г.

[В.В. Румянцев \(1921-2007\)](#) является признанным мировым лидером в области аналитической механики и теории устойчивости движения. С его именем связана разработка теории устойчивости движения тел с полостями, содержащими жидкость, теория устойчивости по части переменных и другие основополагающие результаты в аналитической механике и динамике твердых тел. В выборе научной ориентации школа В.В. Румянцева основывается на научных традициях, заложенных А.М. Ляпуновым и Н.Г. Четаевым, традициях, которые отличаются безукоризненной строгостью постановок задач и методов решения и ясной механической интерпретацией результатов.

Работы В.В. Румянцева получили высокую государственную оценку. В 1980 г. он был удостоен Государственной премии СССР за цикл работ по динамике твердых тел с полостями, содержащими жидкость, и в 1996 г. – Государственной премии Российской Федерации за цикл работ "Динамика тела на струне и смежные задачи". В 1970 г. Валентин Витальевич был избран членом-корреспондентом АН СССР и в 1992 г. — действительным членом Российской Академии наук. В 2004 г. он был удостоен премии им. А.М. Ляпунова Президиума РАН за цикл работ по модификации и развитию метода функций Ляпунова в теории устойчивости и стабилизации движения по отношению к части переменных. В 1995 г. он был избран членом-корреспондентом Международной Астронавтической Академии, а затем, в 2000 г., – действительным членом этой Академии. В 1996 г. он был удостоен премии фонда им. Александра Гумбольдта. В 1997 г. В.В. Румянцев был избран иностранным членом Сербской академии наук и искусств. В 1999 г. удостоен Международной премии К. и А.Г. Агостинелли по теоретической и прикладной механике и по математической физике Национальной академии наук Линчей (Рим, Италия). В 2003 г. избран членом Туринской академии наук.

Тематика работы сектора ТУМУС посвящена развитию и адаптации к современным исследовательским возможностям классических методов теории устойчивости и аналитической механики: развитие алгебраических основ теории Рауса, распространение теории Рауса на динамику систем переменной структуры и системы с деформируемыми элементами, численно-аналитические методы исследования устойчивости, методы исследования устойчивости решений интегродифференциальных и функциональных уравнений, систем с запаздыванием и т.д., аналитические и алгебро-геометрические методы исследования интегрируемости уравнений движения, развитие вариационных принципов механики и уравнений движения в групповых переменных. Полученные в секторе результаты нередко являются пионерскими и вызывают волну последующих исследований в нашей стране и за рубежом. Особую роль играют работы по решению прикладных задач механики, таких как исследование существования и устойчивости равновесных ориентации спутниковых систем с вращающимися и деформируемыми элементами и тросовыми связками, исследование устойчивости колебаний крыла в потоке газа, исследование устойчивости движения составных транспортных систем типа тягач-прицеп или тягач-полуприцеп и др.

Остановимся на циклах работ, которые можно рассматривать как новые направления исследований. Среди первых работ С.Я. Степанова и Р.С. Суликашвили были работы по динамике относительного движения спутников. С.Я. Степанову принадлежит большой цикл работ по стационарным движениям и устойчивости спутника-гиростата и управлению равновесной ориентацией с помощью системы роторов. В специальной полуобратной постановке решены задачи о трехосной и одноосной ориентации спутника в орбитальной системе координат. Недавние исследования С.Я. Степанова и А.А. Бурова показали, что управления равновесной ориентацией можно достичь также с использованием массивных тел, прикрепленных к спутнику с помощью тросов. [Р.С. Суликашвили](#) исследовал влияние симметрии высокого порядка (при равенстве квадратичных моментов инерции) в распределении масс на динамику и устойчивость спутника. С.Я. Степановым и Ван Дань-чжи была разработана теория устойчивости и стабилизации движения на конечном интервале времени и построены численно-аналитические алгоритмы исследования такой

устойчивости. [В.Н. Рубановский \(1941-2002\)](#) был одним из первых, кто в точной постановке исследовал устойчивость стационарных движений спутников с упругими стержнями. В.В. Рубановский и В.В. Румянцев вошли в коллектив авторов, удостоенных в 1996 г. Государственной премии Российской Федерации за цикл работ "Динамика тела на струне и смежные задачи".

Ранние работы В.С. Сергеева посвящены исследованию периодических движений тяжелого твердого тела с неподвижной точкой в случае, близком к случаю Лагранжа. В частности, при равенстве нулю одной из собственных частот найденные движения отвечают в невозмущенной задаче перманентным вращениям вокруг осей, лежащих в главной плоскости инерции тела, от которых отходят регулярные прецессии. Доказано существование двух трехпараметрических семейств периодических движений для твердого тела и гиростата общего вида. Для твердого тела с произвольным распределением масс доказана устойчивость перманентных вращений вокруг главной оси инерции. Позже В.С. Сергеевым была разработана теория устойчивости по Ляпунову решений систем с последействием, описываемых интегродифференциальными уравнениями типа Вольтерры. Доказаны теоремы об устойчивости по первому приближению и теоремы об устойчивости в критических случаях одного нулевого и пары чисто мнимых корней характеристического уравнения. При условии асимптотической устойчивости доказана возможность представления общего решения рядами по степеням начальных значений с экспоненциально стремящимися к нулю коэффициентами. Указан способ получения оценки области притяжения, основанный на использовании мажорант Ляпунова. В качестве одного из приложений проведено исследование асимптотической устойчивости и устойчивости при постоянно действующих возмущениях положения равновесия вязкоупругого крыла в нестационарном воздушном потоке. Построено общее решение в форме ряда.

[А.В. Карапетяном](#) разработана теория устойчивости движения систем с дифференциальными связями. В частности, обнаружен "диссипативный эффект", связанный с возможностью асимптотической устойчивости стационарных движений консервативных механических систем, и эффект зависимости устойчивости от направления движения. Доказана корректность предельного перехода от систем с большим вязким трением к системам с дифференциальными связями на конечном интервале времени и при некоторых дополнительных условиях на бесконечном интервале времени. Классические результаты Рауса-Ляпунова-Сальвадори и Пуанкаре-Четаева-Смейла о существовании, устойчивости и бифуркации стационарных движений консервативных механических систем распространены на инвариантные множества консервативных и диссипативных систем. Дано полное исследование существования, устойчивости и ветвления стационарных движений тяжелого твердого тела на горизонтальной плоскости в случаях абсолютно гладкой и абсолютно шероховатой плоскости и плоскости с трением скольжения. Исследована динамика твердого тела с неподвижной точкой и твердого тела со струнным приводом с учетом сопротивления окружающей среды. Исследованы задачи динамики тела с жидкостью, в случаях тела с неподвижной точкой, тела со струнным приводом и тела на плоскости при различных гипотезах взаимодействия с плоскостью. Проведен параметрический анализ динамики трехмерного мобильного робота: найдены стационарные и периодические движения, исследованы их устойчивость и ветвление.

В ранних работах А.С. Сумбатова найдены конструктивные аналитические признаки существования скрытых циклических координат в голономных системах с двумя и тремя степенями свободы и линейных первых интегралов в неголономных системах. Для неголономных систем изучена обратная задача вариационного исчисления. Более поздний цикл работ посвящен исследованию механики систем с трением в рамках модели абсолютно твердого тела и закона трения Кулона. Дано развитие результатов магистерской диссертации Е.А. Болотова и одной работы С.А. Чаплыгина по исследованию движения твердого по поверхности с трением. С помощью аналитических и численных методов исследована динамика ряда конкретных механических систем

с трением. В частности, дано объяснение необычному поведению астрономического прибора, известного как "маятник Пошехонова".

В работах А.А. Бурова исследован вопрос интегрируемости уравнений движения в задачах о колебаниях спутника на эллиптической орбите, о катании твердого тела по гладкой плоскости, в ряде задач динамики маятниковых систем. В задачах о катании твердого тела по гладкой плоскости, о движении тяжелого твердого тела на струне, о движении твердого тела в потоке частиц были найдены случаи существования дополнительного частного интеграла, аналогичного интегралу Гесса в задаче о движении тяжелого твердого тела вокруг неподвижной точки. Некоторые из этих результатов распространены на случай односторонних связей.

Е.В. Абраровой получена классификация равновесных конфигураций, их устойчивости и бифуркации для спутника, состоящего из сосредоточенных масс и стержней, с учетом точного выражения ньютоновского потенциала. А.С. Кулешов получил явный вид линейных по обобщенным скоростям интегралов в задаче о движении тела вращения по шероховатой плоскости, существенно обобщив классические результаты Муштари в этой задаче. Н.Н. Титова составила полный атлас симметричных периодических движений спутника в окрестности точек либрации ограниченной плоской эллиптической фотогравитационной задачи трех тел. С.В. Хизгияев изучал динамику одномерного двухмассового осциллятора, в котором оба груза связаны линейно упругой пружиной, причем, первый груз крепится к неподвижному ограничителю другой упругой пружиной, и на этот груз действует еще сила вязкого трения, а второй груз лежит на бесконечной ленте с сухим трением, бегущей с постоянной скоростью. Описанная механическая система является простейшей моделью музыкального смычкового инструмента. Существенным моментом анализа динамических свойств модели является различие статического и динамического коэффициентов сухого трения. С.В. Хизгияевым полностью решена задача отыскания в системе автоколебательных режимов с двумя переключениями: скольжение второго груза относительно бегущей ленты \rightarrow прилипание груза к ленте \rightarrow новое скольжение.

Кроме основных сотрудников в совместных исследованиях сектора, проводимых по трудовым соглашениям в рамках проектов РФФИ, гранта Президента РФ "Ведущие научные школы" и проекта ФЦП Интеграция принимает участие большое число ученых, аспирантов и студентов, работающих в МГУ, УлГУ, ИПУ, МГУС, МГАПИ. Отметим лишь некоторые из направлений их совместной с сектором ТУМУС работы. Новое важное направление исследования устойчивости решений неавтономных нелинейных систем дифференциальных и функционально-дифференциальных уравнений развивается А.С. Андреевым (УлГУ) и его учениками. В.Н. Тхаем (ИПУ РАН) с учениками разрабатывается теория симметричных периодических движений обратимых систем. Найдены периодические движения, и исследована их устойчивость в задаче движения твердого тела вокруг неподвижной точки, в задаче о катании тела по шероховатой поверхности, в задаче о колебаниях спутника на эллиптической орбите, в фотогравитационной задаче трех тел и в других задачах. И.И. Косенко (МГУС), используя современный пакет DIMOLA, предназначенный для численно-аналитического моделирования и расчета движений в системах многих тел, в классической задаче о движении кельтского камня выявил не только хорошо известные потерю устойчивости и изменение направления вращения, но и перевероты с подскоками.

Сотрудники сектора ТУМУС принимают активное участие в организации и проведении многочисленных национальных и основных международных форумов по механике и устойчивости движения. В.В.Румянцев был председателем или членом научного комитета всех Четаевских конференций "Проблемы аналитической механики и управления движением", председателем секции "Аналитическая механика и устойчивость движения" Всесоюзных съездов по теоретической и прикладной механике, руководителем ряда Международных симпозиумов по классической и небесной механике (Великие Луки), в организации и проведении которых активное

участие принимали сотрудники сектора ТУМУС. С.Я. Степанов, В.С. Сергеев, А.В. Карапетян, А.С. Сумбатов входят в состав членов Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике. В.В. Румянцев многие годы исполнял обязанности главного редактора журнала "Прикладная математика и механика".

Сектор ТУМУС на протяжении многих лет поддерживает тесные творческие контакты с коллегами из стран ближнего и дальнего зарубежья:

Математический институт им А. Размадзе ГрАН (Тбилиси, Грузия),
Ташкентский государственный университет (Ташкент, Узбекистан),
Институт математики НАН Украины (Киев, Украина),
Институт прикладной математики НАН Украины (Донецк, Украина),
Institut fuer Mechanik, Technische Universitaet (Wien, Austria),
Departement de Mathematique, Facultes Universitaires Notre-Dame de la Paix (Belgium),
Faculte des Sciences Appliquees, Universite Catholique de Louvain (Belgium),
Department of Mathematics, University Quebec at Montreal (Canada),
C.E.R.M.I.C.S., Ecole Nationale des Ponts et Chaussees (France),
Laboratoire de Modelisation en Mecanique, Universite Paris VI (France),
Labaratoire IBIS, Universite d'Evry Val d'Essonne (France),
Institut fuer Technische Mechanik, Technische Universitaet Karlsruhe (Germany),
Technische Hochschule in Darmstadt (Germany),
Departimento di Matematica, l'Universita di Torino (Italy),
Departimento di Meccanica, l'Universita di Trento (Italy),
Mathematical Institute of the National Academy of Sciences (Beograd, Serbia),
Department of Mathematics, University of Texas (USA),
Instytut Podstawowykh Problemow Techniki PAN (Warszawa, Poland)

и др.

Ведущие ученые с мировым именем были гостями лаборатории и сектора ТУМУС. Среди них Г. Трогер (Австрия), В. Пайффер (Бельгия), П. Каподанно, Д. Шеваллье, М. Паскаль (Франция), П. Хагедорн, Й. Виттенбург (Германия), С. Бененти, Д. Галлетто, Л. Сальвадори (Италия), С. Котовский, Я. Слявяновский (Польша), В. Вуйчич (Yugoslavia), акад. НАН Украины В.Н. Кошляков (1922-2009) и др. В.В. Румянцев, С.Я. Степанов, А.В. Карапетян, А.А. Буров неоднократно читали лекции в качестве приглашенных профессоров в ведущих европейских университетах. Свидетельством актуальности и значимости проводимых исследований является также приток в сектор отечественной и зарубежной научной молодежи. Стажировки иностранных студентов в секторе ТУМУС получают высокие оценки в европейских институтах.

С некоторыми направлениями работ сектора ТУМУС можно познакомиться по приведенному ниже списку монографий и обзору работ, опубликованных в издаваемом в секторе [сборнике "Задачи исследования устойчивости и стабилизации движения"](#).

Список монографий сектора ТУМУС

1. Моисеев П.Н., Румянцев В.В. Динамика твердых тел с полостями, содержащими жидкость. М.: Наука. 1965.
2. Румянцев В.В. Об устойчивости стационарных движений спутников. М.: ВЦ АН СССР, 1967.
3. Rumyantsev V.V. Dynamics and Stability of Rigid Bodies. Roma: Edizioni Cremonese, 1972.
4. Карапетян А.В., Румянцев В.В. Устойчивость консервативных и диссипативных систем. Итоги науки и техники. Общая механика. Т.6. М.: ВИНТИ, 1983, 132 с.

5. Румянцев В.В., Озиранер А.С. Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных. М.: Наука, 1987.
6. Рубановский В.Н., Самсонов В.А. Устойчивость стационарных движений в примерах и задачах. М.: Наука, 1988.
7. Karapetyan A.V. Stability of steady motions of mechanical systems. Publ. du Depart. Math. Fac. Univ. Namur. 1989. 57 p.
8. Karapetyan A.M., Rumyantsev V.V. Stability of conservative and dissipative systems. Applied Mechanics Soviet Reviews. Vol. I: Stability and Analytical Mechanics. New York: Hemisphere, 1990. P. 1-144.
9. Карапетян А.В. Устойчивость стационарных движений. М.: Эдиториал УрСС, 1998. 165 с.
10. Сумбатов А.С., Юнин Е.К. Очерки о трении. М.: ВЦ РАН. 2000. 141 с.
11. Воротников В.И., Румянцев В.В. Устойчивость и управление по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения". М.: Научный мир, 2001. 320 с.

Дополнительную информацию о секторе ТУМУС, сотрудниках и их публикациях можно получить на сайте ВЦ РАН <http://www.ccas.ru/>, а также на сайте <http://chetaev.msu.ru/school.html>, посвященном школе Н.Г. Четаева.

Сектор кинетической теории газов (КТГ)

Сектор КТГ был образован в ВЦ АН СССР 9 января 1965 г. (первоначально сектор КТГ назывался "Лаборатория математических методов теории разреженных газов"). Его руководителем был А.А. Никольский, выдающийся ученый в области аэродинамики и кинетической теории газов. Сотрудниками сектора стали его молодые ученики и аспиранты, пришедшие вместе с ним из Института механики АН СССР (до 1965 г. А.А. Никольский был директором Института механики): И.О. Власов, И.Н. Ларина, Е.Ф. Лимар, А.А. Пярнпуу, В.А. Рыков, Ф.Г. Черемисин, Т.И. Чуканова, Е.М. Шахов, В.П. Шидловский. Интерес к динамике разреженного газа был связан во многом с началом космических полетов, развитием новых, в том числе вакуумных технологий, а также в связи с появлением быстродействующей вычислительной техники. Первые расчеты проводились на ЭВМ "Стрела" со сравнительно слабыми вычислительными ресурсами. Существенное продвижение реализация численных методов решения задач разреженных газов получила после появления в ВЦ АН СССР ЭВМ БЭСМ-6.

Развивающаяся вычислительная техника стимулировала поиск прямых методов решения уравнения Больцмана, лежащего в основе кинетической теории и являющегося сложным нелинейным интегро-дифференциальным уравнением. Это научное направление было отмечено директором ВЦ акад. А.А. Дородницыным как одно из престижных направлений для ВЦ и для отечественной науки. Пионерские для нашей страны и одни из первых в мире расчеты уравнения Больцмана были выполнены Ф.Г. Черемисиным. Косвенную поддержку этим исследованиям, которые многим тогда казались бесперспективными, оказали опубликованные несколько ранее решения уравнения Больцмана, полученные группой Нордсика на суперкомпьютере ИЛИАК в Иллинойсе, США. Существенно, что до сих пор работы Ф.Г. Черемисина и его последователей остаются одними из самых продвинутых в мире. В 2004 г. Ф.Г. Черемисин был приглашен сделать доклад "Прямое решение уравнения Больцмана" на 24-м Международном симпозиуме по динамике разреженных газов в г. Бари (Италия). Наиболее слабым звеном отечественных ЭВМ в то время была малая оперативная память. В первом варианте метода Ф.Г.Черемисина этот недостаток преодолевался

ценой значительного увеличения объема вычислений и позволял получить 2-3 последовательных приближения.

Е.М.Шаховым было предложено другое направление исследований, связанное с развитием и использованием кинетических уравнений с упрощенным интегралом столкновений — модельным интегралом. Это позволило решить ряд достаточно сложных аэродинамических задач обтекания тел. Была построена процедура последовательности уточняющих моделей. Первое приближение, так называемое S-модельное уравнение, обеспечивает в отличие от известной модели ВГК правильное число Прандтля. Модель Шахова получила признание в нашей стране и за рубежом и не потеряла актуальности и в настоящее время.

Начиная с работ А.А. Никольского, важной частью исследований, существенно дополнявших численные методы, был поиск аналитических закономерностей, точных частных решений на основе полуаналитических подходов. В.И. Рыков нашел точное решение простейшей изотропной задачи, которая могла выступать в качестве тестовой, и предложил новое модельное уравнение для одномерных течений. Для задач обтекания летательных аппаратов двухатомным газом (воздухом) им было построено модельное кинетическое уравнение, учитывающее вращательные степени свободы молекул. В дальнейшем В.И. Рыков (частично совместно с И.Н. Лариной) усовершенствовал уравнения кинетических процессов для молекул с внутренними степенями свободы. Одно из основных направлений исследований В.А. Рыкова — развитие численных методов и решение задач разреженного газа с помощью модельных уравнений. С помощью модельного кинетического уравнения ВГК И.Н. Лариной впервые были решены весьма сложные для того времени стационарные задачи обтекания сферы одноатомным газом при умеренных и больших числах Кнудсена и различных числах Маха.

В подходе прямого решения уравнения Больцмана, разрабатываемом Е.Ф. Лимаром, интегралы столкновений аппроксимировались полиномами. Здесь сказалось определенное воздействие метода Шахова, используемого при построении последовательности приближающих модельных уравнений. При вычислении интеграла столкновений Е.Ф. Лимаром была отмечена важность свойства кинетической (микроскопической) консервативности. Он получил несколько решений уравнения Больцмана вплоть до двумерных задач о поперечном обтекании пластины.

В 1967 г. в секторе произошли организационные изменения: заведующим был назначен О.С. Рыжов, и сектор был переименован в лабораторию теории процессов переноса. В 1989 г. лаборатория была разделена на два сектора КТГ и АМГД, которые вошли в состав отдела механики. В рамках лаборатории теории процессов переноса проходили плодотворные дискуссии специалистов в различных областях газовой динамики, кинетической теории, прикладной математики, занимающихся численными и аналитическими методами. Сотрудники одновременно участвовали в работе по нескольким направлениям исследований. В.И. Жук был аспирантом Е.М. Шахова, кроме этого выполнил ряд работ по изучению течений разреженного газа в сотрудничестве с О.С. Рыжовым и Е.Д. Терентьевым, а затем переориентировался на исследование проблемы устойчивости в газовой динамике. Сейчас В.И. Жук является заведующим сектором асимптотических методов в газовой динамике отдела механики сплошных сред. Нельзя не упомянуть и других сотрудников: В.Н. Диесперова, А.М. Бишаева, Ю.И. Ромашкевича, М.И. Градобоева, И.В. Савенкова, А.И. Державину, лаборантов Н.К. Сеницыну и Е.А. Филиппину, принимавших участие в работе лаборатории в разные годы.

А.А. Пярнпуу и В.П. Шидловский работали в лаборатории теории процессов переноса до середины 70-х годов (затем они перешли в лабораторию акад. О.М. Белоцерковского). Одно из направлений исследований А.А. Пярнпуу — изучение взаимодействия газов с поверхностью, являющееся важным аспектом кинетической теории газов. Определение физически обоснованных граничных условий на границе с твердым телом и до сих пор является еще во многом неисследованной проблемой. В то время эти работы [2] были одними из первых в данной области. Научные интересы

В.П. Шидловского были связаны с различными задачами газовой динамики и кинетической теории [3].

С.П. Попов стал сотрудником лаборатории теории процессов переноса после окончания аспирантуры ВЦ АН СССР в 1972 г. Его исследования очень многообразны. Им были исследованы газодинамические задачи о движении газа с учетом вязкости и теплопроводности под действием сходящихся поршней (совместно с В.П. Пархоменко и А.А. Махмудовым), изучены процессы обтекания при движении в атмосфере метеорных тел с гиперзвуковыми скоростями в режиме интенсивного лучистого теплообмена, установлена структура дальнего следа, определены характеристики волн цунами, вызванных падением астероидов и комет. С.П. Попов принимал участие в расчетах двумерных струйных течений газа в сложных геометрических областях, а также течений несжимаемой жидкости между двумя сферами. Совместно с сотрудниками спецсектора Института физики Земли АН СССР он участвовал в работах по изучению процесса испарения с поверхности твердого тела под действием излучения оптического квантового генератора. В соавторстве с В.И. Жуком опубликовал ряд работ, посвященных процессам развития длинноволновых возмущений в пограничном слое с самоиндуцированным давлением. С 1988 г. С.П. Попов занимался разработкой численных методов решения солитонсодержащих уравнений гидродинамического типа, которые были им применены для исследования уравнений Кортевега-де Фриза, Бенджамина-Оно, Кадомцева-Петвиашвили, Лидке-Спачека, Богоявленского-Вольтерра и др. (по этой тематике им была защищена докторская диссертация). В последнее время совместно с Ф.Г. Черемисиным он проводил исследования различных течений газа на основе схем, сочетающих численную аппроксимацию уравнений Больцмана и Навье-Стокса.

В 70-х-80-х гг. развивались теоретические принципы построения численных схем кинетической теории, расширялся класс решаемых задач. Ф.Г. Черемисиным были предприняты попытки решения двумерных задач. Сама демонстрация возможности получения таких решений имела большое значение, но точность оказалась невысокой. Важным шагом в повышении надежности решений явился предложенный В.В. Аристовым и Ф.Г. Черемисиным консервативный метод расщепления решения уравнения Больцмана (В.В. Аристов был аспирантом Е.М. Шахова и Ф.Г. Черемисина, а с 1977 г. стал сотрудником лаборатории). Консервативная коррекция решения перераспределяла ошибку вычислений (в случае смеси газов перераспределение проводилось и между компонентами) так, чтобы обеспечить сохранение массы, импульса и энергии. При этом ошибка, вносимая процедурой коррекции, не превышала аппроксимационной погрешности схемы. С помощью этого метода было решено большое число задач для однокомпонентного газа и для смеси газов [4]. Надежные решения, полученные для одномерных классических задач о структуре ударной волны и о теплопередаче, опережали зарубежные аналоги.

Были сформулированы две концепции консервативности для кинетических уравнений: гидродинамической (макроскопической) и кинетической (микроскопической). В гидродинамической концепции разностная схема строится, исходя из аппроксимации первых пяти моментных уравнений, следующих из уравнения Больцмана. Проще всего такой подход реализуется в консервативном методе расщепления. Кинетическая концепция требует обеспечения выполнения законов сохранения непосредственно для интеграла столкновений, где фигурируют функции распределения только одного временного слоя (одной итерации). Такой подход, по сути дела, заложен в методах статистического моделирования и рассматривался Е.Ф. Лимаром, а в последние годы Ф.Г. Черемисиным. Предложенный Ф.Г. Черемисиным метод позволил построить эффективные вычислительные алгоритмы для моделирования течений разреженного газа в широком диапазоне физических параметров, для любых молекулярных потенциалов и задач различной размерности. Обе концепции имеют свои достоинства и недостатки. Микроскопическая консервативность отражает законы сохранения на дискретном уровне при

столкновениях частиц, не внося дополнительных ошибок, как при коррекции. Существенным преимуществом гидродинамической консервативности является возможность использования неявных схем, что особенно важно при малых числах Кнудсена, когда система уравнений, решаемых с использованием процедуры дискретных скоростей, становится жесткой.

В.В. Аристовым был предложен новый метод решения уравнения Больцмана, где для кусочно-постоянной аппроксимации в пространстве скоростей удается провести точное интегрирование по углам столкновения в операторе столкновений, что позволило построить простую аппроксимацию интегралов столкновений; консервативность в данном подходе обеспечивалась упомянутой выше коррекцией.

Консервативный метод расщепления естественно привел к построению в начале 80-х гг. асимптотических кинетических схем для аппроксимации гидродинамических уравнений. Схемы В.В. Аристова и Ф.Г. Черемисина приближают уравнения Эйлера: разлет + максвеллизация или уравнения Навье-Стокса: разлет + трансформация в приближенную функцию распределения по методу Чепмена-Энскога (как оказалось, схемы для уравнения Эйлера фактически совпали с аналогичными схемами, разрабатываемыми независимо в различных странах, схемы для уравнений Навье-Стокса оказались первыми кинетическими схемами такого рода). В последние годы интерес к кинетическим методам существенно вырос, в частности из-за возможности ставить реалистические кинетические граничные условия. При этом можно различать схемы собственно для функции распределения и для макроскопических параметров (кинетически-согласованные схемы).

Проблема перехода от разреженного газа к сплошной среде в рамках кинетического подхода чрезвычайно важна. Основная идея метода, предложенного В.А. Рыковым на основе модельных уравнений, состояла в использовании уравнений сохранения, замкнутых при помощи итерационной интегральной формы кинетических модельных уравнений. В.А. Рыковым совместно с А.М. Бишаевым и Е.Н. Деминой были развиты численные методы решения стационарных задач разреженного газа во всем диапазоне чисел Кнудсена.

Одним из возможных описаний течений, близких к течению сплошной среды, является использование различных уравнений в разных областях течения. Метод совместного решения уравнений Больцмана и Навье-Стокса, разработанный С.П. Поповым и Ф.Г. Черемисиним, дал существенный выигрыш во времени счета по сравнению с решением уравнения Больцмана во всей области течения и расширил область применения уравнений Навье-Стокса за счет правильной постановки граничных условий на границе твердого тела, где может быть сильная неравновесность газа.

Е.М. Шаховым и В.В. Аристовым были изучены течения при больших числах Маха. В случае предельно малой температуры функция распределения рассматривалась как дельта-функция, что характерно для сильных выбросов газа, молекулярных пучков и т.д. Весьма интересным является появление в таких задачах решений типа бегущих волн.

В.И. Рыковым и И.Н. Лариной были разработаны численные итерационные методы для стационарных задач обтекания тел потоком как одноатомного, так и двухатомного газов. Ими построены новые граничные условия для двухатомного газа, взаимодействующего с поверхностью твердого тела, сформулированы законы подобия гиперзвуковых течений разреженного газа, В рамках проекта "Буран" было рассчитано тепловое взаимодействие летательного аппарата с гиперзвуковым потоком двухатомного газа.

В.А. Рыковым построено кинетическое уравнение Больцмана для химически реагирующего газа. На его основе совместно с В.А. Мацуком развито обобщение метода Чепмена-Энскога и дан вывод уравнений сплошной среды для смеси химически реагирующих газов. Совместно с А.М. Бишаевым определены вариационные принципы

Онзагера для линейного уравнения Больцмана. Получены законы сохранения, которые управляют изменением среднего радиуса облака газа при его разлете в пустоту.

Для моделирования реальных газов необходимо было разработать методы решения обобщенных кинетических уравнений, учитывающих переход внутренней энергии в энергию поступательного движения. Таким уравнением является уравнение Ванг Чанг-Уленбека, где рассмотрение различных квантовых уровней позволяет получить систему кинетических уравнений, как в случае смеси газов. Это уравнение сложнее уравнения Больцмана, но оно решается на современных компьютерах. Метод решения уравнения Ванг Чанг-Уленбека, обобщающий консервативный метод решения уравнения Больцмана, впервые был предложен Ф.Г. Черемисиным.

В результате многолетней работы Е.М. Шаховым и его последователями был существенно расширен класс задач, решаемых на основе S-модельного уравнения, была повышена точность и изучены новые возможности решения, особенно для окколосплошносредних режимов течения. Е.М. Шаховым был разработан консервативный конечно-разностный метод второго порядка точности, изучены нестационарные течения газа, вызванные испарением с поверхности плоской пластины, кругового цилиндра и сферы при различных значениях коэффициента аккомодации, исследованы внутренние течения в каналах и трубах, рассмотрен вопрос о пределах применимости одномерной теории в течениях типа Пуазейля.

На основе метода прямого решения уравнения Больцмана в конце 80-х — начале 90-х гг. были получены решения двумерных задач, которые хорошо согласовывались с экспериментальными данными. Например, было изучено отражение ударной волны от клина и выяснены условия нерегулярного (маховского) отражения. Исследованы задачи о течениях в элементах криовакуумной техники с граничными условиями, моделирующими конденсацию и испарение [4]. Были получены первые решения трехмерных задач. В это время появились отечественные экспериментальные данные по структуре неустойчивых недорасширенных струй и в секторе было начато изучение задач о свободных струях. Решение этих задач облегчается ввиду отсутствия для основного пространства течения граничных условий на твердой стенке. Для таких задач была изучена неустойчивость течений при малых числах Кнудсена.

В конце 80-х гг. В.В. Аристов высказал гипотезу о возможности описания перехода к неустойчивости и турбулентности в газе с помощью уравнения Больцмана. Предполагается, что неустойчивые нестационарные решения могут существенно отклоняться от равновесия, что обуславливает интенсивный перенос импульса и энергии, характерный для турбулентных течений. В середине 90-х гг. были получены первые неустойчивые решения уравнения Больцмана для трехмерных струйных течений в закритическом режиме с турбулентными пульсациями. По характерной частоте и масштабу амплитуды пульсаций расчеты согласовывались с экспериментом. Был выявлен механизм неустойчивости, связанный с потерей осесимметричного характера течения и появлением продольных вихревых структур типа Тейлора-Гертлера. Проводилась проверка того, что данные решения не являются следствием численной неустойчивости. Однако эта сложная проблема требует дальнейшего всестороннего исследования.

Такие задачи оказались актуальными, поскольку в 90-х гг. изучение неустойчивости было начато на основе методов статистического моделирования и позже на основе модельных кинетических уравнений. С уменьшением числа Кнудсена стационарное течение газа около тела теряет устойчивость, и обтекание происходит в нестационарном режиме. В.А. Рыковым и И.Н. Лариной были разработаны методы расчета нестационарных течений газа при малых числах Кнудсена. Эти методы основаны на использовании как модельных кинетических уравнений, так и линеаризованного уравнения Больцмана. В последнее десятилетие этими методами решены задачи с потерей устойчивости потока и образованием вторичных вихревых течений.

В 80-90-е гг. В.В. Аристовым были поставлены задачи о неоднородной релаксации со специфичным кинетическим описанием неравновесных нелинейных процессов. В простейшей модели открытой системы неоднородная неравновесная проточная

структура на масштабе длины свободного пробега поддерживается за счет задания неравновесных граничных условий. В случае одноатомного газа была выявлена (аналитически и численно) интересная закономерность — потоки тепла имеют тот же знак, что и градиент температуры. Такой же аномальный характер имеет соотношение между компонентами тензора неравновесных напряжений и градиентами скорости. В случае экспериментального подтверждения откроется возможность интересных приложений.

В.В. Аристовым, И.Г. Мамедовой, С.А. Забелоком и А.А. Фроловой были предложены алгоритмы параллельных вычислений по схеме прямого решения уравнения Больцмана (с использованием изначальной однородности используемых схем) по физическому или скоростному пространству.

Упомянем также работы, прямо не относящиеся к тематике сектора, но имеющие черты, характерные для кинетико-статистического метода. Ф.Г. Черемисиным было получено решение уравнений Смолуховского-Эйнштейна для дисперсных сред, где аналогично решению уравнения Больцмана рассчитывался процесс коагуляции водяных капель в дождевом облаке и были получены хорошо согласующиеся с экспериментом результаты. Можно также отметить цикл работ В.В. Аристова по построению статистических моделей пространства-времени.

В целом работы сотрудников сектора кинетической теории газов получили признание в нашей стране и за рубежом. Методы и отдельные результаты помимо нашей страны использовались в Германии, Италии, США, Польше, Японии, Китае и в других странах. В последние годы сотрудники сектора вместе с коллегами из США участвуют в совместном проекте по разработке единого кинетического метода решения уравнения Больцмана на основе развитых в секторе методов.

Список монографий сектора КТГ

1. Шахов Е.М. Метод исследования движений разреженного газа. М.: Наука, 1974. 208 с.
2. Пярнпуу А.А. Взаимодействие молекул газа с поверхностью. М.: Наука, 1974. 192 с.
3. Шидловский В.П. Введение в динамику разреженных газов. М.: Наука, 1965. 218 с.
4. Аристов В.В., Черемисин Ф.Г. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: ВЦ РАН, 1992. 192 с.
5. Aristov V.V. Direct methods for solving the Boltzmann equation and study of nonequilibrium flows. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 312 p.

Более подробную информацию о секторе КТГ, сотрудниках и их работах можно получить на сайте ВЦ РАН <http://www.ccas.ru/>.