

МГУ имени М.В. Ломоносова

КАФЕДРА ГАЗОВОЙ И ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ — КОСМОСУ

О космических исследованиях,
проводимых на кафедре газовой и
волновой динамики механико-
математического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова



Об основателе кафедры Х.А. Рахматулине

Послевоенные годы – время становления сверхзвуковой авиации, ракетостроения и космонавтики. Большие сверхзвуковые скорости полетов сопровождались новыми для техники явлениями: ударными волнами, высокими температурами и химическими реакциями. Разные высоты полета диктовали моделирование аэродинамических характеристик летательных аппаратов и ракет в очень широком диапазоне плотности атмосферы и скорости полета. Это потребовало подготовки специалистов по газовой динамике, новому для тех времен разделу аэромеханики.

Развитие техники привело к необходимости изучения и математического моделирования переходных, нестационарных процессов, сопровождающихся распространением волн в различных средах. Оказалось, что несмотря на разнообразие физических свойств материалов, в которых наблюдаются динамические, волновые процессы, в

них есть много общих свойств, характерных для условий существования и взаимодействия волн.

Взросший уровень скоростей взаимодействия тел, сопровождался существенно необратимыми процессами, что требовало развития термодинамики необратимых процессов.

Настоятельная необходимость изучения и моделирования динамического поведения материалов и свойств газов при высоких скоростях и температурах, а также подготовки специалистов по этим направлениям науки, привели к необходимости создания **кафедры газовой и волновой динамики.**

Кафедра газовой динамики была создана в 1951 году. Организовал кафедру и бесценно руководил ею до 10 января 1988 г. Герой Социалистического Труда, академик АН УзССР, доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР и УзССР, лауреат Государственной премии СССР (дважды), премии Совета министров СССР (дважды), Государственной премии УзССР им. Бируни и Ломоносовской премии профессор **Халил Ахмедович РАХМАТУЛИН (23.04.1909 - 10.01.1988)**. В 1954 г. под руководством профессора

РАХМАТУЛИН

Халил Ахмедович

23.04.1909 - 10.01.1988



Х.А. Рахматулина создана кафедра волновой динамики. Через несколько месяцев обе кафедры были объединены под названием **кафедры газовой и волновой динамики**.

В 1979 г. для проведения прикладных исследований в интересах ракетной и космической отраслей при кафедре была организована отраслевая лаборатория необратимых волновых процессов и высокоскоростного метания. Ее первым заведующим с 1979 г. по 1990 г. был Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, генерал-лейтенант, профессор **Георгий Александрович ТЮЛИН (09.12.1914 - 22.04.1990)**.

В 1987 г. на механико-математическом факультете при активном участии профессора Г.А. Тюлина был создан Отдел прикладных исследований по математике и механике под руководством Ректора МГУ академика В.А. Садовниченко. Целью создания отдела было решение актуальных задач в интересах космической отрасли, в частности связанных с противостоянием программе СОИ (Стратегическая оборонная инициатива), разворачивавшейся в то время в США. В составе Отдела при кафедре газовой и волновой динамики была создана вторая научно-исследовательская лаборатория –

лаборатория динамики деформируемых сред. Первым заведующим лабораторией был лауреат премии Совета Министров СССР, доцент **Виктор Федорович МАКСИМОВ (04.12.1940 - 11.04.2020)**.

Наряду с заведыванием кафедрой Х.А. Рахматулин работал по совместительству в Центральном НИИ Машиностроения (ЦНИИМаш) – головном институте ракетно-космической отрасли. Большое количество его учеников и выпускников кафедры возглавило крупные отделы и лаборатории ЦНИИМаша. Х.А. Рахматулину принадлежит идея создания аэродинамической базы в ЦНИИМаше, а также ее дальнейшее воплощение. Предложение было поддержано Главным конструктором С.П. КОРОЛЕВЫМ. В результате в ЦНИИМаше была создана самая крупная для того времени экспериментальная база по аэродинамике в составе: установки адиабатического сжатия, серии ударных труб большого диаметра и установки электродугового разогрева с вращающейся дугой, позволявшей получать поток воздуха при давлениях 150 – 200 атмосфер и температурах 5000-6000 градусов. Создание экспериментальной аэродинамической базы было необходимо для исследования входа космических аппаратов в атмосферу.

Выход аппаратов в космос, где средние скорости составляют 8 км/сек, поставил вопрос о высокоскоростном взаимодействии тел, в частности взаимодействии элементов конструкций с мелкими частицами при высокоскоростном столкновении. Для изучения поведения материалов при высоких скоростях столкновения Х.А. Рахматулиным была предложена идея трехступенчатой легкогазовой установки с гидропоршнем. В дальнейшем эти идеи были развиты и воплощены Н.Н. Поповым. Крупными «легкогазовыми пушками» были оснащены исследовательские центры в Томске и Бийске. Эти установки позволяли исследовать взаимодействие тел, движущихся с космическими скоростями (до 10 км/сек).

Исследования Х.А. Рахматулина охватывают динамические проблемы распространения упругих и упругопластических волн, дифракции ударных волн, распространяющихся в газе, теории парашюта и аэродинамики пронизываемого тела, движения многокомпонентных сред. Во всех перечисленных направлениях Х.А. Рахматулину принадлежат основополагающие научные результаты решений динамических проблем механики, вошедшие в сокровищницу отечественной и мировой науки.

В области теории упругопластических сред Х.А. Рахматулин открыл особые волны разгрузки, обусловленные необратимостью процессов пластических деформаций. В литературе эти волны называются «**волнами Рахматулина**». Он установил закон распространения упругопластических волн, законы накопления остаточных деформаций при многократных нагрузках, разработал методики получения динамических диаграмм растяжения и сжатия материалов за пределами упругости. Эта теория является основой расчета различных сооружений, расчетов пробивания преград. Его монография «Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках» приобрела мировую известность.

Основополагающими явились также исследования Х.А. Рахматулина в теории поперечного удара. Им была выявлена волновая картина, возникающая при ударе по гибким нитям. За исследования по динамике упругопластических волн и волн в гибких связях Х.А. Рахматулин был удостоен Государственной премии СССР (1949) и премии им. М.В. Ломоносова (1945).

На основе идей, методов и результатов исследований Х.А. Рахматулина по теории обтекания пронизываемых тел и теории движения многокомпонентных и многофазных

МАКСИМОВ

Виктор Федорович

04.12.1940 - 11.04.2020



сред возникли школы и лаборатории, в том числе и в Московском университете, сотрудники которых успешно ведут научные исследования по этим современным актуальным проблемам механики.

Возникшие отраслевые институты активно сотрудничали с кафедрой газовой и волновой динамики и применяли результаты научных исследований Х.А. Рахматулина по аэродинамике проницаемых сред для разработки различных типов парашютов для организации мягкой посадки спускаемых космических аппаратов.

Х.А. Рахматулин – основоположник теории взаимопроникающего движения многофазных сред. Им впервые была получена замкнутая система уравнений движения смеси нескольких сжимаемых фаз, проанализированы основные законы распространения волн, даны основы теории пограничного слоя в двухфазной смеси. Впервые им была поставлена и решена задача о сверхзвуковом потоке газа, содержащего твердые и жидкие частицы. Этот интенсивно развивающийся раздел механики многим обязан Х.А. Рахматулину. В 1979 году Х.А. Рахматулин был удостоен звания Героя Социалистического Труда,

во многом за прикладные исследования, направленные на освоение космического пространства.

О Г.А.Тюлине

Георгия Александровича ТЮЛИНА (09.12.1914 - 22.04.1990) судьба свела с Х.А. Рахматулиным еще в студенческие годы. В 1937-38 гг. будучи на третьем курсе он стал работать препаратором лаборатории аэродинамики по хоздоговору, заключенному молодым ученым Х.А. Рахматулиным с НИИ-3 по тематике С.П. Королева. Именно тогда был заложен фундамент творческих взаимоотношений Г.А. Тюлина и Х.А. Рахматулина. В 1938 г. договор МГУ с НИИ-3 неожиданно прервался, т.к. С.П. Королев был репрессирован.

С ноября 1941 г. Г. А. Тюлин в действующей армии в частях реактивной артиллерии, прошел путь от командира батареи в 1941 до начальника технического отдела главного управления Гвардейских минометных частей в 1944, награжден многими орденами и медалями. В конце войны Верховный Главнокомандующий направил большую группу специалистов авиации, ракетной техники в Германию, чтобы изучить трофейные ракеты ФАУ-1 и

поручили подполковнику Г.А. Тюлину. Так появилось в предместьях Берлина летом 1945 г. «хозяйство Тюлина», обозначенное так на указателях. Среди прибывших сюда специалистов были Ю.А. Победоносцев, С.С. Лавров, В.П. Глушко, Н.А. Пилюгин, М.С. Рязанский, Л.А. Воскресенский. В сентябре прибыл С.П. Королев, потом Ю.А. Мозжорин. Г.А. Тюлин возглавил расчетно-теоретическое бюро в Институте Рабе, вошедшем позже в институт Нордхаузен. Бюро проводило расчеты по аэродинамике, баллистике, устойчивости движения и прочности ракет. Г.А. Тюлин тесно контактировал с С.П. Королевым, который уже присматривал себе сподвижников на будущее: Ю.А. Мозжорина, С.С. Лаврова, Н.Ф. Герасюту. С.П. Королев вполне обратил в свою веру и Г.А. Тюлина, но последнего смущало то, что он военный, и что А.И. Соколов его не отпустит из армии. Это огорчало Г.А. Тюлина, т.к. он мечтал о научной работе, не предполагая, что в дальнейшем пути военного и научного работника могут соединиться.

Г.А. Тюлин неоднократно был председателем Госкомиссии по запуску сначала баллистических ракет, затем ракет, выводящих на орбиту искусственные

ТЮЛИН

Георгий Александрович

09.12.1914 - 22.04.1990



спутники Земли (ИСЗ) и межпланетные автоматические станции. Примерами могут служить запуск автоматической межпланетной станции «Марс-1», запущенной в конце 1962 г. и передавшей 61 сеанс радиосвязи до марта 1963 г.; запуски межпланетных станций к Венере, многих лунников. Однако самыми беспокойными и ответственными были Госкомиссии, возглавляемые Г.А. Тюлиным, по запуску пилотируемых космических кораблей. Таковыми были Госкомиссии по запуску корабля «Восток-5» с Валерием Быковским и «Восток-6» с Валентиной Терешковой. В. Быковский стартовал 15 июня 1963 г., 16 июня проводили в космос первую женщину-космонавта В. Терешкову. Г.А. Тюлин возглавлял также Госкомиссии по запуску В. Комарова, К. Феоктистова и Б. Егорова на «Восходе» 12 декабря 1964 г.; затем последовал запуск с П. Беляевым и А. Леоновым, который вышел в открытый космос.

В июне 1959 г. с целью усиления научно-исследовательского центра НИИ-88 в Подлипках (ныне г. Королев) заместитель председателя Совета Министров СССР Д.Ф. Устинов решил провести некоторую реорганизацию Института. Посоветовавшись с главными конструкторами ракетной отрасли и, прежде всего с С.П. Королевым, он решил

поставить во главе Института Г.А. Тюлина. В 1963 г. Г.А.Тюлина назначили первым заместителем председателя Государственного Комитета Оборона по ракетно-космической отрасли. С марта 1965 г. из этого Комитета было организовано Министерство общего машиностроения, возглавляемое С.А. Афанасьевым, его первым заместителем стал Г.А. Тюлин.

Г.А. Тюлин был председателем Госкомиссии при участии М.В. Келдыша, С.П. Королева и Г.Н. Бабакина по мягкой посадке на Луну аппарата «Луна-9». 3 февраля 1966 г. «Луна-9» мягко прилунилась в Океане Бурь, сделав целый ряд открытий. В 1975 г. Г.А. Тюлину было доверено возглавлять международную комиссию по запуску и стыковке советского корабля «Союз» с американским «Аполлоном».

В Министерстве Общего Машиностроения Г.А. Тюлин проработал 11 лет. В 1976 г. в звании генерал-лейтенанта он вышел на пенсию. В 1977 г. Г.А. Тюлин возвратился в альма-матер, где стал работать на полставки старшим научным сотрудником (впоследствии - главным научным сотрудником) кафедры газовой и волновой динамики, возглавляемой академиком АН Уз. ССР Х.А. Рахматулиным.

Г. А. Тюлин (второй слева) с первыми членами отряда космонавтов.



Г. А. Тюлин и С. П. Королев в Германии, 1945 г.



В 1979 г. Г.А. Тюлин организовал при кафедре и возглавил отраслевую лабораторию волновых процессов, финансируемую Министерством Машиностроения СССР.

Лаборатория необратимых волновых процессов и высокоскоростного метания с момента создания комплектовалась выпускниками механико-математического факультета, многие из которых в дальнейшем перешли на педагогическую работу на кафедры факультета, либо на научную работу в НИИ. В числе сотрудников лаборатории в различное время были Н.Н. Смирнов, М.Н. Моргунов, А.Б. Киселев, В.М. Гендугов, Ю.Г. Филиппов, В.Р. Душин, В.А. Прошкин, В.Л. Натяганов, В.П. Колпаков, А.Ю. Демьянов, И.И. Панфилов, В.А. Нерченко, Л.А. Голенева. В научной работе лаборатории кроме штатных сотрудников участвовали профессор и преподаватели кафедры. Основными направлениями работ лаборатории были фундаментальные исследования и математическое моделирование закономерностей быстропротекающих процессов в физически и химически трансформирующихся многофазных средах, а также применение полученных фундаментальных результатов при решении практических задач внутренней и

внешней баллистики и соударения, и разработке изделий новой техники. За время существования лаборатории ее сотрудниками были получены премия Совета Министров СССР (1990), премия им. И.И.Шувалова (1993), защищены 3 докторские и 14 кандидатских диссертаций.

Под руководством Г.А. Тюлина в конце восьмидесятых годов в лабораториях и на кафедре были начаты исследования возникновения и эволюции «космического мусора» - новой техногенной среды, образовавшейся в околоземном космическом пространстве в результате космической деятельности Человечества. Разработанные впоследствии новые механические модели, и полученные на их основе долгосрочные прогнозы эволюции объектов «космического мусора» оказались точнее зарубежных аналогов, и позволили нашей стране занять одно из лидирующих мест в данной области.

Первая в мире женщина-космонавт Валентина Терешкова.

Спиной стоит председатель госкомиссии по запуску корабля Восток-6 Г.А.Тюлин

Снимок сделан перед полетом корабля Восток-6.

ЗАПУСК 16 ИЮНЯ 1963 09:29 UTC

ПОСАДКА 19 ИЮНЯ 1963 08:20 UTC



Ю.А. Демьянов

Вместе с С.П.Королевым - одним из основных создателей советской ракетно-космической техники, обеспечившей стратегический паритет и сделавшей СССР передовой ракетно-космической державой, **Юрий Андреевич ДЕМЬЯНОВ (01.08.1931 - 07.12.2019)** организовывал и разрабатывал проекты по созданию первого пилотируемого космического корабля «Восток-1», реализовавшего первый в мире полёт человека в космос – Юрия Гагарина, за что был удостоен Ленинской премии.

Ю.А. Демьянов закончил Московский государственный университет в 1953 году, поступил в аспирантуру, в 1957 году защитил кандидатскую диссертацию, в 1965 году - докторскую диссертацию.

Творческая и педагогическая деятельность Юрия Андреевича неразрывно связана с Московским государственным университетом. С 1989 года он был председателем Государственной аттестационной комиссии механико-математического факультета МГУ

по специальности «Механика». С 1972 года он был членом Российского Национального Комитета по теоретической и прикладной механике. Более 40 лет он был членом Экспертного совета ВАК по математике и механике.

За вклад в развитие ракетно-космической техники и в связи с полетом первого человека в космос он удостоен Ленинской премии (1961г.), награжден Орденом Ленина (1971г.), медалью имени С.П. Королева. За работу по исследованию формирования пограничных слоев за ударными волнами и контактными разрывами Юрий Андреевич удостоен премии и медали имени профессора Н.Е. Жуковского (1978г.). Также он награжден медалью имени П.Л.Капицы. В 2003 году Юрию Андреевичу присуждено звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Юрий Андреевич Демьянов был выдающимся ученым и талантливым педагогом. Он один из тех легендарных людей, благодаря которым наша страна стала первой страной в мире, покорившей космос. Исследования Ю.А. Демьянова продолжают на кафедре его учениками [1-5].

ДЕМЬЯНОВ

Юрий Андреевич

01.08.1931 - 07.12.2019



Механика разрушения Твердых тел

Сотрудники кафедры газовой и волновой динамики и отраслевых лабораторий провели множество исследований, результаты которых либо напрямую, либо опосредованно нашли приложение при разработке изделий ракетно-космической техники, осуществлении запусков и эксплуатации космических аппаратов.

Целый ряд исследований кафедры посвящен развитию теории динамики соударения тела со средой, проблеме высокоскоростного взаимодействия твердых деформируемых тел (жидкости, металлы, грунты, бетон, лед). Это вторая (после волн разгрузки) группа классических результатов. Фундаментальными работами в этом направлении были монографии **Артура Яковлевича САГОМОНЯНА (23.03.1914 – 18.08.2001)**: А.Я. Сагомонян “Проникание” (М.: Изд-во МГУ, 1974), А.Я. Сагомонян “Удар и проникание в жидкость” (М.: Изд-во МГУ, 1986), А.Я. Сагомонян “Динамика пробивания преград” (М.: Изд-во МГУ, 1988), А.Я. Сагомонян, В.Б. Поручиков “Пространственные

задачи неустановившегося движения сжимаемой жидкости”. (М.: Изд-во МГУ, 1970). В этих монографиях исследован широкий круг практически важных задач. Полученные в них результаты активнейшим образом используются в инженерной практике. **Игорем Николаевичем ЗВЕРЕВЫМ (14.04.1917 – 29.05.2001)** исследовано распространение волн в вязко-упругом и вязко-пластическом стержне (1949 г.).

Продолжением исследований в этом направлении послужили работы **Алексея Борисовича Киселева, Виктор Федорович МАКСИМОВ (04.12.1940 - 11.04.2020)** и **Александра Васильевича Звягина**. На основе современных численных методов детально исследованы задачи взаимодействия реальных проникающих тел с тонкими преградами с учетом процессов откола и разрушения [6, 7]. Построен ряд новых термодинамически конкретных моделей повреждаемых термоупруговязкопластических сред для описания динамического деформирования и микроразрушения материалов [8-15]. Исследования наклонного проникания в различные мишени, взрывного метания пластин проведены в работах А.В. Звягина.

На основе большого научного задела сотрудников

САГОМОНЯН

Артур Яковлевич

23.03.1914 – 18.08.2001



кафедры в этой области разработаны высокоскоростного нормального и наклонного проникания в среды и пробивания преград, позволившие решить многие прикладные задачи аналитическими методами и улучшить методики решения этих задач на ЭВМ. Сформулированы и решены оптимальные задачи о форме тел минимального сопротивления при проникании в деформируемые среды, о минимальной скорости пробивания [16-17]. Решен ряд нестационарных пространственных задач для удара, проникания и пробивания преград оболочками с заполнителем и некоторые задачи штамповки взрывом [18-24].

Особенности пространственного трехмерного деформирования упругопластических тел при ударе численно исследованы А.Б. Киселевым [25-27]. Вопросы динамики упругопластических оболочек с упругим заполнителем численно исследовались в работах [28-30].

За исследования динамических процессов, сопровождающих проникание тел в плотные преграды звания лауреатов **премии Совета Министров СССР** в 1990 г. удостоены Х.А. Рахматулин (посмертно), А.Я.

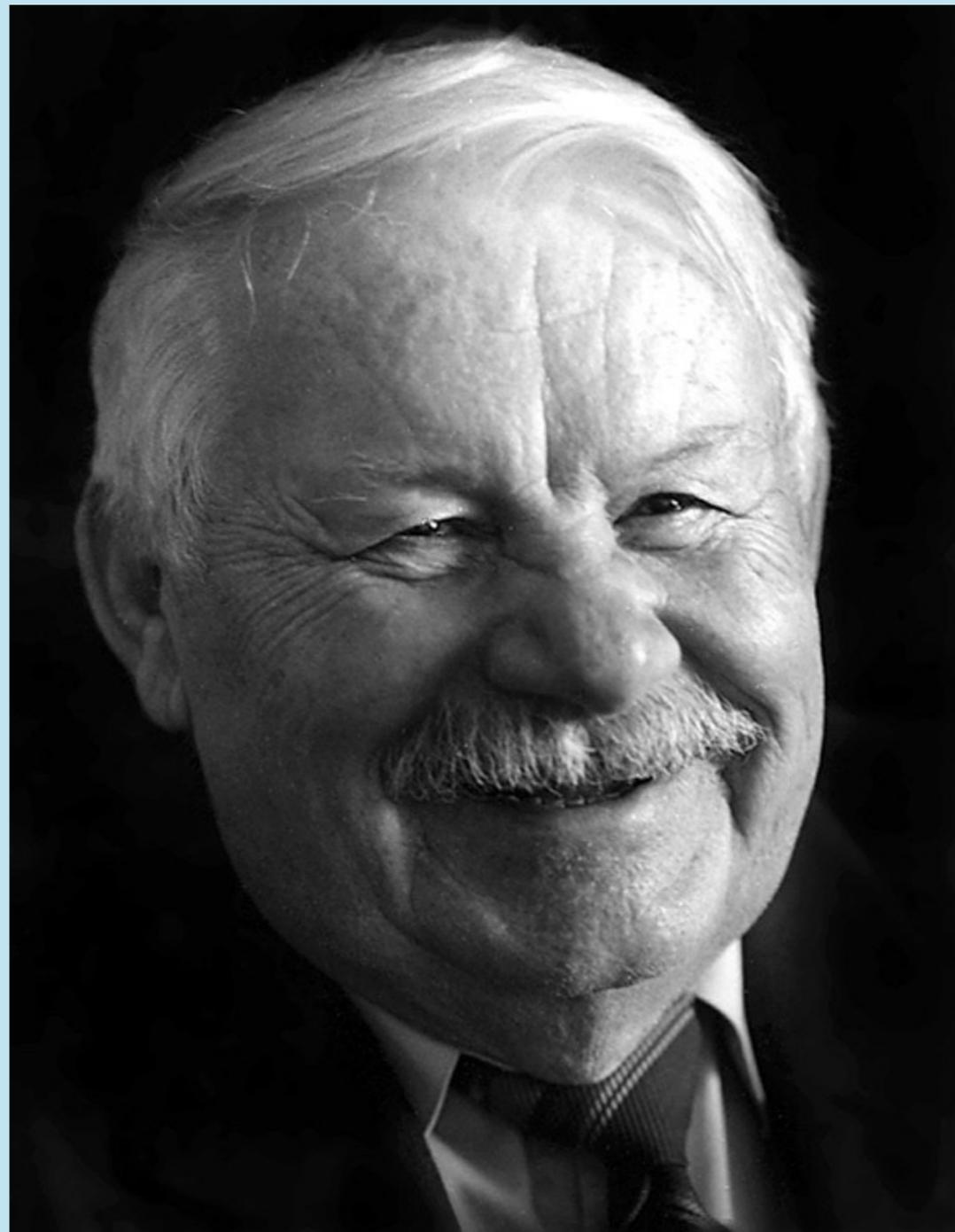
Сагомоян, А.И. Бунимович, А.Б. Киселев, В.Ф. Максимов, А.В. Звягин и В.М. Гендугов.

На кафедре активно развиваются исследования по механике разрушения твердых тел вплоть до разделения их на отдельные фрагменты. Интерес к этому направлению связан, в частности, с проблемой засорения околоземного космического пространства техногенными отходами, а также техническими проблемами дробления горных пород. Такие задачи дробления и фрагментации рассматривались в работах **Евгения Ивановича ШЕМЯКИНА (09.12.1929 – 17.02.2009)** [31-33]. А также продолжились в работах А.Б. Киселева [34-37], **Николая Николаевича Смирнова** [38-39] и их учеников. Результаты исследований по этой тематике вошли и в коллективную монографию, посвященную широкому кругу вопросов, связанных с высокоскоростным взаимодействием тел [40].

ШЕМЯКИН

Евгений Иванович

09.12.1929 – 17.02.2009



Обтекание тел газом

Бурное развитие ракетно-космической техники, создание сверхзвуковых летательных аппаратов выдвинули новые задачи обтекания тел газом. Общепризнанными работами в этом направлении являются работы **Абрама Исааковича БУНИМОВИЧА (22.12.1917 – 3.07.1999)**. Ему принадлежат фундаментальные исследования движения тонких тел с большими сверхзвуковыми скоростями, обтекания тел потоком слабо разреженного газа, теории пограничного слоя. Им создана научная школа по исследованию обтекания тел и систем тел во всем диапазоне высот полета в разреженном газе и построена общая теория локального взаимодействия тел с различными средами, которая нашла широкое применение в задачах определения характеристик и формы тел минимального сопротивления при их движении в среде. Этим вопросам посвящена книга A.I. Bynimovich, A.V. Dybinsky «Mathematical Models and Methods of Localized Interaction Theory» (N.Y., 1995),

также статьи [41-44].

Также на кафедре велись теоретические и экспериментальные исследования задач аэродинамического обтекания вращающихся тел, в том числе с учетом возможного срыва потоков [45-47]. А.И. Бунимовичем и его учениками был проведен большой цикл работ по исследованию обтекания вращающихся тел в потоке разреженного газа [48-49].

БУНИМОВИЧ

Абрам Исаакович

22.12.1917 - 03.07.1999



Горение и детонация

Задачи повышения удельной тяги ракетных двигателей, исследования возникающих в них сильных возмущений потребовали развития теории горения и детонации. Так как формирующиеся при распылении горючего в камерах сгорания смеси являются неоднородными многофазными (гетерогенными), т.е. состоят из капель и паров горючего и окислителя, необходимо было усиленное развитие теории детонации и горения гетерогенных систем.

Развитие ракетной техники привело к резкому увеличению промышленного производства и потребления окислителей. Создание заправочных комплексов ракет-носителей, включающих емкости для хранения и трубопроводы для транспортировки жидкого и газообразного кислорода поставило проблемы взрывоопасности систем содержащих сжиженные окислители во главу угла. Различные органические примеси, смазочные вещества и пр., оседая на внутренней поверхности труб, приводят к образованию взрывоопасных предварительно не

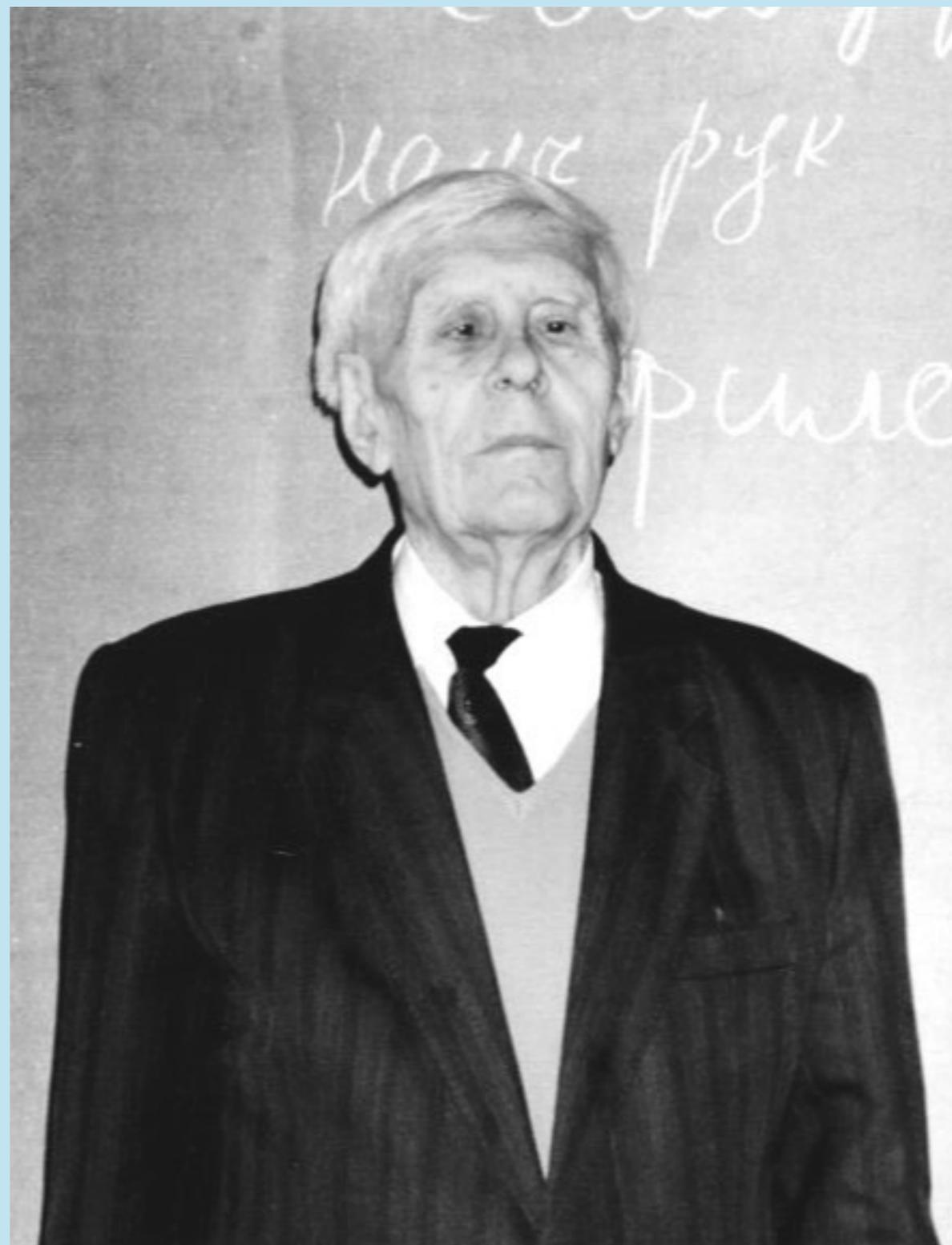
перемешанных гетерогенных систем. В работах **Игоря Николаевича ЗВЕРЕВА (14.04.1917 – 29.05.2001)** исследовано распространение неоднородной детонации в предварительно не перемешанных двухфазных системах (криогенный окислитель и тонкий слой горючего на стенках). Показано, что образуется самоподдерживающийся нестационарный комплекс, содержащий сильные и слабые разрывы и зоны горения или зоны детонации, периодически возникающие у стенок. Исследована детонация в тонких пластинах, пропитанных жидким кислородом с учетом разлета в зоне детонации. Выявлена зависимость скорости распространения детонации от толщины пластины. Исследования И.Н. Зверева по детонации и горению на кафедре продолжены **Николаем Николаевичем Смирновым** и его ученикам.

Созданная школа по процессам детонации и горения внесла весомый вклад в развитие этих направлений науки. Основные этапы научной работы отражены в двух монографиях: И.Н. Зверев, Н.Н. Смирнов "Газодинамика горения" (М.: Изд-во МГУ, 1987), Н.Н. Смирнов, И.Н. Зверев "Гетерогенное горение" (М.: Изд-во МГУ, 1992) и следующих статьях [50-60].

ЗВЕРЕВ

Игорь Николаевич

14.04.1917 – 29.05.2001



Проведённые исследования по переходу горения в детонацию в смесях бензина и дизельного топлива с воздухом позволили разработать эффективный генератор детонационных волн импульсного периодического действия. Созданное на его базе устройство было отмечено медалями ВДНХ, выставок в Хельсинки и Берлине [61-62].

Многие разрабатывавшиеся системы ракет-носителей и ускорителей имели двигатели заполненные смесевым твердым топливом. Скорость сгорания твердого топлива определяла уровень давления в камере сгорания. Для повышения давления прибегали к увеличению площади поверхности горения за счет применения многоканальных зарядов. При возникновении дефектов и трещин в твердом топливе пламя может быстро проникать в трещины (режим конвективного горения), что приводит к резкому возрастанию поверхности горения, возрастанию газопритока и, как следствие, аномальному росту давления, что чревато разрушением камеры сгорания. Именно такой механизм привел к взрыву одного из твердотопливных ускорителей, повлекший за собой катастрофу при запуске космического корабля «Челленджер» с мыса Канаверал. Поэтому изучение

механизмов и управление режимами конвективного горения твердых топлив превратилось в одну из актуальных задач теории гетерогенного горения. В лаборатории волновых процессов была разработана модель конвективного горения унитарных сжимаемых пористых топлив. Установлено существование самоподдерживающихся режимов, обладающих характеристиками как детонационных, так и дефлаграционных волн [63-68]. Н.Н. Смирновы и его учениками ведутся работы по изучению процессов горения в микрогравитации [69-70]. Сотрудники кафедры под руководством Н.Н. Смирнова принимают участие в космических экспериментах по горению в невесомости [71-72]. Кроме того, проводятся исследования по неравновесным волновым процессам в химически-реагирующих многофазных средах и изучаются особенности переходных процессов, а именно: установление детонационного режима, а также его расщепление на ударную волну и следующую за ней волну дефлаграции [73-75]. Под руководством Н.Н. Смирнова проводятся исследования процессов горения и детонации газовых смесей [73,75,76], а также моделирование камер сгорания двигателей, основанных на детонационном сжигании топлива [77-78].

КОВАЛЕВ

Валерий Леонидович

13.08.1952 – 04.10.2015



Важное научное направление, связанное с исследованием входа тел в атмосферу Земли и других планет, представлял на кафедре **Валерий Леонидович КОВАЛЕВ (13.08.1952 – 04.10.2015)**. Им была создана новая методология исследования теплообмена с каталитическими поверхностями высокотемпературных покрытий, применяемых для теплозащиты космических аппаратов. Разработаны и исследованы физико - математические модели для описания течений у каталитических поверхностей при полете тел с большими сверхзвуковыми скоростями в атмосферах Земли и Марса [82-86].

В 2008 году по инициативе В.А. Ковалева при кафедре была создана лаборатория многомасштабного моделирования, а в 2015 году лаборатория стала частью новой самостоятельной кафедры - кафедры инженерной механики и прикладной математики, которую возглавил В.Л. Ковалев. Исследования В.Л. Ковалева продолжают его учениками.

За разработку модели взаимодействия ионизованных смесей с каталитическими поверхностями при их сверхзвуковом обтекании В.Л. Ковалев был награжден медалью им. П.Л. Капицы Академии естественных наук РФ и Ассоциации авторов научных открытий (1996).

Космический мусор

Активное освоение околоземного космического пространства имело и свои негативные последствия. С момента запуска первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года, ознаменовавшего начало эры освоения космоса, Человечество продолжило по нарастающей отправлять на орбиту все новые и новые космические аппараты, чтобы воспользоваться открывшимися новыми возможностями для связи, навигации, предсказания погоды, наблюдения Земли и природных ресурсов, научных и технологических исследований при микрогравитации и т.д. При этом никто не задумывался о возможном негативном воздействии на околоземное космическое пространство. Затем пришло время оглядеться и оценить результаты техногенного воздействия и вызванные ими долгосрочные изменения в околоземном космическом пространстве.

Все возрастающая активность Человечества в космосе привела к образованию на околоземных орбитах большого количества так называемого

“космического мусора”, представляющего собой различные объекты искусственного происхождения и их фрагменты, которые были некогда запущены в космос, а к настоящему времени оказались пассивными и не несущими более никакой полезной нагрузки по использованию, либо разрушились по различным причинам. Эти космические объекты, общее количество которых исчисляется миллионами, обладающие размерами от десятков микрон до одного метра, движущиеся с орбитальными скоростями и остающиеся на орбите в течение многих лет, сформировали новую среду в околоземном пространстве выше стратосферы — пояс “космического мусора”. На низких околоземных орбитах космический мусор сосредоточен в основном на интервале высот от 200 до 2000 км и уже в настоящее время представляет серьезную угрозу для космических полетов и долгосрочных орбитальных проектов. Ниже 200 км уже достаточно сильно проявляется тормозящее воздействие верхних слоев атмосферы, поэтому пассивные объекты не могут долго существовать на низких орбитах, тормозятся и сгорают в атмосфере. Выше 2000 км концентрация объектов мала ввиду низкой предыдущей активности Человека на этих высотах. Исключение, конечно, составляют еще более

высокие геостационарная и геосинхронные орбиты.

Серьезность угрозы столкновения с частицами космического мусора на низких околоземных орбитах состоит в том, что даже столкновение с металлической частицей сантиметрового радиуса для космического аппарата энергетически эквивалентно столкновению с автомобилем массой 1 тонна на скорости 100 км/час.

При сохранении существующих темпов засорения околоземного космического пространства ограничения на надежность долгосрочных космических программ, задаваемые вероятностью столкновения с частицами космического мусора, в ближайшем будущем могут стать более жесткими, нежели ограничения по надежности собственно технических систем. Это приобретает особую важность для разработки теле-радио коммуникационных систем, включающих в качестве космического сегмента серию спутников на низких околоземных орбитах.

Проблема космического мусора начала серьезно изучаться ведущими научно-исследовательскими институтами космических держав, начиная с 80-х годов XX века. Появление и эволюция среды космического мусора обсуждались в узких кругах специалистов на

международных конференциях и рабочих совещаниях космических агентств (NASA, ESA, NASDA, РКА), начиная с 90-х годов. В начале же 21-го века появление множества низкоорбитальных спутниковых систем различного назначения, а также строительство международной космической станции, привлекло к проблеме космического мусора внимание широкого круга различных специалистов.

Современное общество уже не мыслит себя без тех дополнительных возможностей, предоставляемых космическими станциями и малыми спутниками. Это и низкоорбитальная спутниковая связь, и наблюдения Земли, и прогнозы погоды, и работа эффективных навигационных систем, и теле-радиокоммуникации, и получение новых материалов в условиях невесомости. Поэтому адекватная оценка опасности столкновения спутника с элементами космического мусора на различных орбитах необходима для прогноза длительности существования спутника и выбора наиболее безопасных орбит, что, в свою очередь, требует знания уровня заселенности различных орбит и прогноза его эволюции на последующие годы.

Целью долгосрочного прогнозирования засоренности околоземного пространства является предсказание количества объектов как функции времени, высоты снижения и размеров. Эти прогнозы играют важную роль в оценке необходимости применения мер по снижению засоренности, эффективности таких мер, а также влияния новых видов космической деятельности.

Фундаментальные исследования проблем, связанных с космическим мусором, были начаты на механико-математическом факультете МГУ в середине 80-х под руководством Героя Социалистического Труда, Лауреата Ленинской премии, профессора Г.А. Тюлина, продолжены и развиты его учениками в 90-х годах, и по настоящее время активно ведутся в лаборатории волновых процессов под руководством Н.Н. Смирнова, А.Б. Киселева и их учеников [87-89].

Исследования проблемы космического мусора не случайно начались на кафедре газовой и волновой динамики, т.к. они опираются на весь накопленный кафедрой потенциал научных знаний, включая и теорию распространения волн в упруго-пластических средах, разрушение, взрыв, высокоскоростной удар, гидрогазодинамику, теорию движения взаимопроникающих континуумов.

Сотрудниками лаборатории волновых процессов под руководством Н.Н. Смирнова и А.Б. Киселева создана модель новой техногенной среды, возникшей на низких околоземных орбитах – “космического мусора” – позволившая прогнозировать процессы засорения и самоочищения орбит и уточнить (на порядок) время потенциального начала процесса цепного саморазрушения элементов космического мусора и лавинного нарастания их числа [90-93]. Разработанные модели и методы необходимы для оценки степени риска при долговременном функционировании космических аппаратов (спутников связи, космических исследовательских станций) на низких околоземных орбитах. Результаты исследований опубликованы, в частности в монографиях [94-95].

эволюции аэрозолей в стратифицированной атмосфере), динамикой автотранспортных потоков.

Заключение

Подводя итог, следует отметить, что ученые кафедры газовой и волновой динамики внесли большой вклад в развитие научных направлений, так или иначе связанных с космической тематикой. Многие из них непосредственно лично участвовали в создании изделий новой техники или проводили ее испытания. Кафедра, созданная для подготовки специалистов в интересах ракетной и космической отраслей, в полной мере отвечала предъявляемым требованиям и успешно справилась с поставленной задачей. В изменившихся исторических условиях, когда космическая отрасль перестала быть приоритетной, фундаментальные научные результаты, полученные учеными кафедры, нашли приложения в отраслях, связанных с добычей и переработкой нефти и газа (проблемы гидроразрыва, фронтальное вытеснение жидкостей из пористых сред, взрывобезопасность систем хранения и транспортировки сжиженных газов), экологией атмосферы и почв (механические модели эрозии, фильтрации неводных загрязнений,

Литература

- [1] Ю. А. Демьянов, "Асимптотический метод решения задач распространения волн в нити," Прикладная математика и механика, vol. 57, no. 1, pp. 146-149, 1993.
- [2] Ю. А. Демьянов, "К уточнению теории колебаний струн," Доклады Академии наук, vol. 369, no. 4, pp. 461-465, 1999.
- [3] Ю. А. Демьянов, Д. В. Кокорева, А. А. Малашин, "Взаимовлияние поперечных и продольных колебаний в музыкальных инструментах," Прикладная математика и механика, vol. 67, no. 2, pp. 273-283, 2003.
- [4] Ю. А. Демьянов, А. А. Малашин, "Поперечно-продольные волны в струне щипкового инструмента при воздействии медиатора," Прикладная математика и механика, vol. 67, no. 3, 2003.
- [5] Ю. А. Демьянов, А. А. Малашин, "Влияние жесткости на поперечно-продольные движения музыкальных струн," Прикладная математика и механика, no. 1, 2011.
- [6] А.Б. Киселев, В.Ф.Максимов "Численное моделирование нормального пробивания тонкой преграды деформируемым телом вращения". Изв. РАН. МТТ. 1995. № 5;
- [7] А.Б. Киселев "Численное моделирование в трехмерной постановке наклонного пробивания тонких преград". В кн.: Численное решение задач волновой динамики. Кишинев: Штиинца, 1989.
- [8] А.Б. Киселев, М.В. Юмашев "Деформирование и разрушение при ударном нагружении. Модель повреждаемой термоупругопластической среды". ПМТФ. 1990. № 5;
- [9] А.Б. Киселев, М.В. Юмашев "Математическая модель деформирования и разрушения твердого топлива при ударном нагружении". ПМТФ. 1992, № 6;
- [10] А.Б. Киселев, М.В. Юмашев «Численное исследование ударного сжатия микропоры в термоупруговязкопластическом материале». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1992. № 1;
- [11] А.Б. Киселев, М.В. Юмашев «Численное исследование динамических процессов деформирования и микроразрушения повреждаемых термоупругопластической среды». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1994. № 1;
- [12] А.Б. Киселев "Математическое моделирование динамического деформирования и комбинированного микроразрушения термоупруговязкопластической среды". Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1998. №6;
- [13] A.B. Kiselev, M.V. Yumashev, O.V. Volod'ko "Deforming and fracture of metals. The model of damageable thermoelastoviscoplastic medium". J. of Materials Processing Technology. 1998. Vol. 80 - 81;
- [14] A.B. Kiselev "Mathematical modelling of dynamical deforming and combined microfracture of damageable thermoelastoviscoplastic medium". In: Studies in Applied Mechanics 45. Advanced Methods in Materials Processing Defects. Amsterdam: Elsevier, 1997;
- [15] А.Б. Киселев "Математическое моделирование динамических процессов необратимого деформирования и разрушения твердых тел". - Математическое моделирование. 2000. Т. 12, № 6).
- [16] А.И. Бунимович, Г.Е. Якунина «О форме пространственных тел минимального сопротивления, движущихся в пластически-сжимаемой и упругопластической средах». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1987. № 3;
- [17] А.И. Бунимович, Г.Е. Якунина «О форме тел вращения минимального сопротивления, движущихся в пластически сжимаемой и упругопластической средах». ПММ. 1987. Т. 51. № 3
- [18] А.В. Звягин "К вопросу наклонного проникания в грунт". В кн.: Проблемы динамики взаимодействующих сред. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1984;
- [19] А.В. Звягин, А.Я. Сагомоян "Косой удар по пластине из упруго-пластического материала". Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 1;
- [20] А.И. Бунимович, Г.Е. Якунина «О форме тела вращения минимального сопротивления при безотрывном проникании в пластически сжимаемые среды». ПММ. 1989. Т. 53, № 5;
- [21] А.В. Звягин, В.И. Богданов "Штамповка взрывом". Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1990. № 2;
- [22] А.В. Звягин, В.И. Богданов "Метание пластины взрывом". Вестн. МГУ. Сер. 1. 1991. № 2.;
- [23] А.В. Звягин, В.И. Богданов "Численное исследование пространственного проникания жесткого тела в упругопластическую плиту". Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1993. № 4;
- [24] В.М. Гендугов, А.Б. Киселев «Численное исследование откола в пластине при взрыве накладного заряда ВВ». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ.. 1990. № 5.
- [25] А.Б. Киселев «Численное исследование в трехмерной постановке процесса соударения упругопластических тел с жесткой преградой». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1985. № 4;
- [26] А.Б. Киселев «К расчету трехмерной задачи высокоскоростного соударения упругопластического стержня с жесткой преградой». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1988. № 2;

- [27] А.Б. Киселев «Численное моделирование рикошета жесткого ударника от упругопластической преграды в трехмерном случае». В кн.: Механика деформируемых сред. М.: Изд-во МГУ, 1985;
- [28] А.Б. Киселев «Поведение упругопластической оболочки вращения при осесимметричном нагружении». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1981. № 2;
- [29] В.Ф. Максимов, А.Б. Киселев «Численное моделирование сложного взаимодействия упругопластической оболочки вращения с упругим наполнителем». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1982. № 1;
- [30] В.Ф. Максимов, А.Б. Киселев «К численному моделированию сложного взаимодействия оболочки вращения с упругим наполнителем с учетом трения». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1984. № 2.
- [31] Е.И. Шемякин «Свободное разрушение твердых тел». ДАН. 1991. Т. 300, №5;
- [32] Е.И. Шемякин «Задача о хрупком шарнире». Изв. РАН. МТТ. 1996, №2;
- [33] Е.И. Шемякин «О хрупком разрушении твердых тел (плоская деформация)». Изв. РАН. МТТ. 1997. №1
- [34] А.Б. Киселев «Простейшие математические модели разрушения космического аппарата при взрыве». ПМТФ, 1995, №2.;
- [35] А.Б. Киселев «Математическое моделирование фрагментации тонкостенных сферических оболочек под действием динамического внутреннего давления». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1996. №3;
- [36] А.Б. Киселев «Математическое моделирование взрывного разрушения сферических оболочек с образованием двух фракций осколков». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1999. №2;
- [37] А.Б. Киселев «Модель фрагментации при высокоскоростном соударении частиц космического мусора». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 2001. № 3
- [38] N.N. Smirnov, V.F. Nikitin, A.B. Kiselev «Peculiarities of Space debris production in different types of orbital breakups». Proc. of the Second European Conf. on Space Debris, Darmstadt: ESOC, 1997;
- [39] Н.Н. Смирнов А.Б. Киселев, В.Ф. Никитин «К исследованию высокоскоростного взаимодействия элементов космического мусора с газонаполненными оболочками». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Матем. 2002. № 6.
- [40] Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, А.Б. Киселев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.
- [41] А.И. Бунимович «Об обтекании плоской полубесконечной пластины потоком вязкого разреженного газа». Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1959. № 5;
- [42] А.И. Бунимович «Соотношения между силами, действующими на тела, движущиеся в разреженном газе, в потоке света и в гиперзвуковом ньютоновском потоке». Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 4.;
- [43] А.И. Бунимович «Аэродинамические характеристики осесимметричных тел при обтекании в условиях закона локальности». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ.. 1974. № 4;
- [44] А.И. Бунимович, А.В. Дубинский «Развитие, современное состояние и приложения теории локального взаимодействия». Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 3.
- [45] В.П. Шкадова, В.П. Козлов «Модель предсказания силы Магнуса на вращающихся осесимметричных телах». Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. №4;
- [46] В.П. Козлов «Эффекты движущейся стенки, возникающие при поперечном обтекании вращающегося цилиндра дозвуковым потоком». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1993. № 1.;
- [47] В.П. Козлов, М.П. Фалунин, В.П. Шкадова «Экспериментальное исследование поперечного обтекания одиночного и пары авторотирующих цилиндров». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1996. № 2.
- [48] А.И. Бунимович, А.В. Дубинский «Аэродинамические характеристики произвольно вращающихся тел в газе различной разреженности». Космические исследования. 1989. Т. XXVII, вып. 2;
- [49] А.И. Бунимович, А.В. Дубинский «О расчете вращательных производных при локальном взаимодействии потока с поверхностью тела». ПММ. 1998. Т. 62, вып. 1.
- [50] И.Н. Зверев, В.М. Гендугов, Н.И. Зверев «Детонация гетерогенных систем предварительно не смешанных фаз». ФГВ. 1975. № 6.;
- [51] В.М. Гендугов, И.Н. Зверев «Температура поверхности теплопроводящей жидкости за ударной волной при наличии массообмена и химических реакций в пограничном слое». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1973. № 1;
- [52] В.М. Гендугов «Детонация гетерогенных систем предварительно несмешанных фаз». ФГВ. 1972. № 4;
- [53] В.М. Гендугов «О структуре волн детонации в гетерогенных системах с предварительно несмешанными фазами». ФГВ. 1979. № 5;
- [54] В.М. Гендугов «Об устойчивости границы раздела газ-жидкость за фронтом ударной волны, скользящей вдоль поверхности пленки жидкости». ФГВ. 1978. № 1;
- [55] В.М. Гендугов «Диффузионное пламя в турбулентном пограничном слое за ударной волной, скользящей вдоль поверхности жидкого топлива». ФГВ. 1979. № 2; № 1;
- [56] И.Н. Зверев, Н.Н. Смирнов «Тепло-массообмен над слоем горючего за ударной волной». ФГВ. 1981. № 6;
- [57] Н.Н. Смирнов «Горение слоя топлива при обдувании поверхности потоком окислителя», ФГВ. 1982. № 5;
- [58] Н.Н. Смирнов «Нестационарное гетерогенное горение топлива». ФГВ. 1991. № 2;
- [59] N.N. Smirnov «Combustion and detonation in multiphase media. Initiation of detonation in dispersed-film systems behind a shock wave». Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1988. Vol. 31, No. 4;

- [60] Н.Н. Смирнов "Горение и детонация в многофазных средах, содержащих жидкое горючее". ФГВ. 1988. Т. 24, № 3.
- [61] Н.Н. Смирнов, И.Н. Зверев, А.П. Бойченко, С.А. Курников «Внутренняя баллистика детонационной установки для разработки грунтов». В кн.: Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред. Ереван, 1987;
- [62] N.N. Smirnov, N.I. Zverev, A.P. Boytchenko «Der einsatz des gasdetonationsprinzipes zur durchdringung herter und gefrorener bodenschichten». Harvard des Ostens, Berlin, 1993).
- [63] Н.Н. Смирнов «Конвективное горение в каналах и трещинах в твердом топливе». ФГВ. 1985. № 5;
- [64] Н.Н. Смирнов «Конвективное горение и слабая детонация в твердых топливах». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1987. № 3;
- [65] Н.Н. Смирнов, И.Д. Димитриенко "Исследование конвективного горения в сжимаемом твердом топливе с продольными каналами". ФГВ. 1990. №4;
- [66] Н.Н. Смирнов "Модель горения пористых диспергирующих топлив". ФГВ. 1991. №1;
- [67] Н.Н. Смирнов, А.Г. Бердюгин «О существовании стационарных самоподдерживающихся режимов сгорания пористых и канальных топлив». ФГВ. 1991. № 4;
- [68] Н.Н. Смирнов, С.И. Сафаргулова «О скорости распространения малых возмущений в пористых средах». ПММ. 1991. Т. 55, вып. 3; Н.Н. Смирнов, С.И. Сафаргулова «О распространении слабых возмущений при горении сжимаемых пористых топлив». ФГВ. 1991. № 2.
- [69] Tyurenkova V.V., Smirnova M.N., Nikitin V.F. Two-phase fuel droplet burning in weightlessness // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 176. – P. 672-681.
- [70] Tyurenkova V. V., Stamov L. I. Flame propagation in weightlessness above the burning surface of material // Acta Astronautica. – 2019. – Vol. 159. – P. 342-348.
- [71] Smirnov N.N. Space Flight Safety: experiments and supercomputing // Acta Astronautica. – 2019. – Vol. 163, no. A. – P. 1-5.
- [72] Urban David L., Ferkul Paul, Olson Sandra, Ruff Gary A., Easton John, T'ien James S., Liao Ya-Ting T., Chengyao Li, Fernandez-Pello Carlos, Torero Jose L., Legros Guillaume, Eigenbrod Christian, Smirnov Nickolay, Fujita Osamu, Rouvreau Sébastien, Toth Balazs, Jomaas Grunde. Flame spread: Effects of microgravity and scale // Combustion and Flame. – 2019. – Vol. 199. – P. 168-182.
- [73] Smirnov N. N., Nikitin V. F., Stamov L. I., Nerchenko V. A., Tyurenkova V. V. Numerical Simulations of Gaseous Detonation Propagation Using Different Supercomputing Architectures // International Journal of Computational Methods. 2017. Vol. 14, no. 4. P. 1750038-1–1750038-41.
- [74] Smirnov N. N., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Nikitin V. F., Stamov L. I., Tyurenkova V. V. Detonation onset following shock wave focusing // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 114–130.
- [75] Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Филиппов Ю.Г., Шемякин Е.И. Развитие детонации при переходе из кольцевого зазора в камеру сгорания // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2009. № 3. С. 67–72.
- [76] V. F. Nikitin, E. V. Mikhailchenko. Safety of a rotating detonation engine fed by acetylene - oxygen mixture launching stage. Acta Astronautica, 2021.
- [77] N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov, E. V. Mikhailchenko, V. V. Tyurenkova. Three-dimensional modeling of rotating detonation in a ramjet engine. Acta Astronautica, 163(A):168-176, 2019.
- [78] N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov, E. V. Mikhailchenko, V. V. Tyurenkova. Rotating detonation in a ramjet engine three-dimensional modeling. Aerospace Science and Technology, 81:213-224, 2018.
- [79] В.Л. Ковалев, О.Н. Суслов «Модель взаимодействия частично ионизованного воздуха с каталитической поверхностью. Исследования по гиперзвуковой аэродинамике и теплообмену с учетом неравновесных химических реакций». М.: Изд-во Моск. ун-та. 1987 ;
- [80] В.Л. Ковалев, А.А. Крупнов «Особенности моделирования теплообмена с каталитическими поверхностями при входе тел в атмосферу Земли». Вест. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1998. № 5;
- [81] В.Л. Ковалев «Моделирование каталитических свойств теплозащитных покрытий при входе в атмосферу Марса». Вест. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1999. № 1;
- [82] В.Л. Ковалев, А.Ф. Колесников, А.А. Крупнов, М.И. Якушин «Анализ феноменологических моделей, описывающих каталитические свойства поверхности высокотемпературной многоразовой теплоизоляции». Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 6;
- [83] В.Л. Ковалев, А.А. Крупнов, Г.А. Тирский «Решение уравнений вязкого ударного слоя методом простых глобальных итераций по градиенту давления и форме ударной волны». ДАН. 1994. Т. 338. № 3;
- [84] В.Л. Ковалев «Моделирование процессов диффузии при описании неравновесных течений у каталитических поверхностей». Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 1995. № 1;
- [85] В.Л. Ковалев «Гетерогенные каталитические процессы при входе в атмосферу». - М.: ЦПИ при мех-мат ф-те МГУ, 1999;
- [86] В.Л. Ковалев «Гетерогенные каталитические процессы в гиперзвуковых потоках». - М.: Наука, 2001.
- [87] N. N. Smirnov, A.B. Kiselev, V.F. Nikitin, Investigation of High-speed Collisions of Space Debris Particles with Gas-filled Shells, 2003 Moscow University Mechanics Bulletin, Allerton Press. (Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 1 Matematika Mekhanika) (1), pp. 54-66.
- [88] N. N. Smirnov, A. B. Kiselev, P. P. Zakharov, Numerical simulation of the high-speed collision of the ball and the spherical fluid-filled shell, Acta Astronautica. 163 (2019) 62-72.
- [89] N. N. Smirnov, A.B. Kiselev, P.P. Zakharov, R.V. Muratov, D.M. Bukharinskaya. The usage of adaptive mesh refinement in simulation of high-velocity collision between impactor and thin-

- [90] *Н.Н. Смирнов и др.* «Space Debris Evolution Mathematical Modelling». Proc. 1-st Europ. Conf. on Space Debris, Darmstadt, 1993;
- [91] *Н.Н. Смирнов, А.Б. Киселев, В.Ф. Никитин* «Peculiarities of Space Debris Production in Orbital Breakups». Proc. 2-nd Europ. Conf. on Space Debris, Darmstadt, 1997;
- [92] *N.N. Smirnov, A.I. Nazarenko, A.B. Kiselev* "LEO technogeneous ontaminants evolution modeling with account of satellites collisions". – Space Debris 2000 (Ed. J. Bendisch). Sc. and Technol. Series American Astronaut. Society. 2001. Vol. 103;
- [93] *Н.Н. Смирнов, А.Б. Киселев, А.И. Назаренко* «Математическое моделирование эволюции космического мусора на околоземных орбитах». - Вестн. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 2002. № 4)
- [94] "Space Debris Hazard evaluation and mitigation". Edited by *N.N. Smirnov*. – London and New York: Taylor and Francis, 2002. 216 p.;
- [95] «Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду». Под общей редакцией В.В. Адушкина, С.И. Козлова и А.В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. 640 с. (один из авторов - *А.Б. Киселев*).

Кафедра газовой и волновой динамики
механико-математического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

© 2022 Кафедра газовой и волновой
динамики