

7. Hurle I. R. Measurements of hydrogen-atom recombination rates behind shock waves. In 11-th Sympos. Internat. on Combustion, Berkeley, Calif, 1966, Pittsburgh, Pa, Combust. Inst., 1967, pp. 827—835.
8. Bulewicz E. M., Sugden T. M. The recombination of hydrogen atoms and hydroxyl radicals in hydrogen flame gases. Trans. Farad. Soc., 1958, vol. 54, pt 12, p. 1855.
9. Rosenfeld J. L. J., Sugden T. M. Burning velocity and free radical recombination rates in low temperature hydrogen flames. Combust. and Flame, 1964, vol. 8, No. 1, pp. 37—50.
10. Dixon-Lewis G., Sutton M. M., Williams A. The kinetic of hydrogen atom recombination. Disc. Farad. Soc., 1962, No. 33, p. 205.
11. Schott G. L., Bird P. R. Kinetic studies of hydroxyl radicals in shock waves. J. Chem. Phys., 1964, vol. 41, No. 9.
12. Getzinger R. W. A shock-wave study of recombination in near stoichiometric hydrogen-oxygen mixtures. In: 11-th Sympos. on Combustion, Berkeley, Calif, 1966, Pittsburgh, Pa, Combust. Inst., 1967, pp. 117—124.
13. Olschewski H. A., Troe J., Wagner H. G. G. Homogener thermischer Zerfall von Wasserdampf. Z. Physik. Chem. (N. F.), 1965, Bd 47, Nr 5, 6.
14. Getzinger R. W., Blair L. S. Recombination in the hydrogen-oxygen reaction: a shock tube study with nitrogen and water vapour as third bodies. Combust. and Flame, 1969, vol. 13, No. 3.
15. Lezberg E. A., Franciscus L. C. Effects of exhaust nozzle recombination on hypersonic ramjet performance I. Experimental measurements. AIAA Journal, 1963, vol. 1, No. 9, p. 2071.
16. Файзулов Ф. М., Соболев Н. Н., Кудрявцев Е. Н. Спектроскопическое исследование состояния газа за ударной волной. Оптика и спектроскопия, 1960, № 5.

VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ДИНАМИКЕ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

(г. Пиза, Италия, 29 июня — 3 июля 1970 г.)

Очередной Международный симпозиум по динамике разреженных газов, проводившийся в итальянском городе Пиза, собрал представителей 17 стран, включая СССР. Тематика симпозиума была весьма широкой — от вопросов техники и методологии проведения эксперимента до чисто математических проблем существования и единственности решения кинетических уравнений. Ниже дается краткий обзор докладов, представленных на симпозиуме.

Несколько докладов было посвящено вопросам кинетической теории, главным образом в применении к линейным задачам. Так, в докладе Фетца и Шена (США) рассматривался вопрос о решении задачи Коши для линеаризованного уравнения Больцмана. Используя метод полугрупп в гильбертовом пространстве, авторы доказывают возможность получения нескольких классов точных решений линейных задач в тех случаях, когда известны решения аналогичных задач без учета молекулярных столкновений.

В докладе И. Соне (Япония) продолжается и развивается работа, представленная автором в 1968 г. на симпозиуме в США и посвященная асимптотической теории движения разреженного газа вблизи гладкой поверхности при малых числах Кнудсена. Работа представляет интерес главным образом с методической точки зрения, проливая свет на правильный подход к постановке граничных условий при использовании тех или иных уравнений.

В последнее время в динамике разреженных газов приобрели широкое распространение различные вариационные принципы. Доклад Лойялки и Ланга (ФРГ) посвящен исследованию пределов применимости этих принципов. Как показывает анализ авторов, многие из налагаемых ограничений могут быть сняты, а разные вариационные принципы сводятся к одному, более общему («принцип Руссополуса»). В докладе приводятся очень простые, но достаточно наглядные примеры применения принципа Руссополуса.

Минцер и Смит (США) посвятили свой доклад развитию кинетической теории газовых смесей. Если ранее эти авторы рассматривали предельный случай газа Лоренца, то на этот раз был исследован противоположный предельный случай (газ Рэлея). Помимо вопросов общетеоретического характера в работе рассмотрена задача о релаксации начальных распределений одной из компонент смеси в каждом из предельных случаев.

Шарф (Швейцария) сделал содержательный доклад о математических проблемах решения линеаризованного уравнения Больцмана. Пользуясь методами функционального анализа (теория полугрупп для соответствующих операторов), автор доказывает существование и единственность в большом для решения начальных и граничных задач. Кроме того, он устанавливает связь между общим и «нормализованным» решением, построенным по методу Чепмена — Энскога.

Ряд докладов был посвящен теоретическим исследованиям обтекания тел потоком разреженного газа. Харрис и Кумар (США) в своем докладе дали приближенный анализ гиперзвукового потока в окрестности вершины конуса под нулевым углом атаки. Здесь был использован метод Пробстейна, при котором поток на сравнительно большом удалении от тела рассматривается на основе уравнений Навье — Стокса (эта область включает в себя структуру ударной волны), а вблизи поверхности применяются упрощенные уравнения вязкого слоя. Хотя авторы и дали численную схему расчета, но фактически ими были получены лишь главные члены асимптотических разложений по параметру, обратному числу Рейнольдса.

Приближенные аналитические методы развивались также в докладах Уитфилда (США), разработавшего методику определения коэффициентов сопротивления цилиндра и сферы в гиперзвуковом режиме и при произвольных числах Кнудсена, а также Э. Ю (США), рассмотревшего обтекание иглы под нулевым углом атаки.

В качестве приложений кинетической теории можно указать на результаты Брука и Гамеля (США) о взаимодействии сферического источника с разреженной атмосферой, полученных путем применения метода малого параметра. Ковитц и Хеллман (США) воспользовались методом Минцера (метод обобщенных ортогональных полиномов) для исследования газовых потоков, индуцируемых внезапным изменением температуры поверхности. Интересным был доклад Фримена (Англия), рассказавшего о различных теоретических подходах к решению задачи о сферически симметричном расширении газа в вакуум. Докладчик исследовал как подходы, основанные на применении уравнений Навье — Стокса, так и подходы при помощи методов кинетической теории, провел ряд конкретных оценок и сравнений.

Вопросы исследования структуры ударных волн затрагивались во многих сообщениях более общего характера. Кроме того, состоялись два доклада о структуре ударных волн в двухатомном газе — доклад Хейта (США) и доклад Гидденса, Барбарика и Хуана (США). Доклады были различны по постановке, результатам и использованным моделям газа, но в обоих случаях авторы применяли численные методы, причем в обоих докладах имеются также указания на поисковый характер проводимых работ.

Несколько докладов было посвящено проблемам теплопередачи в разреженных газах. Так, Чиполла и Черчиньяни (Италия) на основе линеаризованного уравнения Больцмана решили задачу об одномерном потоке тепла, пользуясь при этом разработанным Черчиньяни вариационным методом. Вильямс (Англия) использует тот же метод для изучения простейших случаев возникновения градиентов давления и макроскопического движения под влиянием температурных перепадов. Э. Ю (США) при помощи метода линеаризации исследовал задачу о нестационарном переносе тепла в радиальном направлении. Крюгер, Лармит и Де-Вит (Голландия) методом Черчиньяни провели расчеты для течения в длинном капилляре, обусловленного температурным градиентом. Эти исследователи дают также описание соответствующей экспериментальной установки и приводят результаты, полученные в ней для чисел Кнудсена в диапазоне между 10^{-3} и 1.

Схема решения сложной задачи о разделении смеси одноатомных газов в криволинейной ударной волне изложена в докладе Оберап и Рагурамана (Индия).

Был представлен и ряд докладов, где, по существу, рассматривались задачи механики сплошной среды, однако за счет тех или иных причин было необходимо учитывать «эффекты разреженности». Так, в докладе М. Н. Когана (СССР) приводились примеры задач, для которых члены, соответствующие второму приближению в методе Чепмена — Энскога, играют существенную роль, несмотря на отсутствие разреженности в обычном понимании этого слова. И. И. Шидловская и В. П. Шидловский (СССР) рассказали о задачах газовой смазки, когда тот же эффект проявляется в результате малости зазора газового подшипника. Общее исследование рациональной постановки граничных условий при решении задач о неустановившихся течениях газа малой плотности при помощи уравнений Навье — Стокса было дано в докладе Фишдона и Любонского (Польша). А. К. Ребров и С. Ф. Чекарчев (СССР) представили доклад о цилиндрическом и сферическом расширении газа в затопленном пространстве; за основу принимались уравнения Навье — Стокса, решение строилось методом итераций.

Симпозиум в Италии подтвердил непрерывно усиливающуюся в последние годы тенденцию к применению численных методов и расчетов на ЭВМ в динамике разреженных газов. Большую популярность приобрел, например, метод Г. Берда (Австралия), сводящийся к прямому численному моделированию молекулярных процессов в газе путем «случайных розыгрышей» (разновидность метода Монте-Карло).

Один из докладов, представленных Бердом на симпозиуме, был посвящен доказательству эквивалентности предлагаемой им процедуры решения кинетического уравнения Больцмана. Доказательство нельзя, однако, считать вполне убедительным, так как Берд использует в основном физическое пространство, а пространство скоростей является для него как бы вспомогательным; в уравнении же Больцмана оба пространства равноправны.

Второй доклад Берда был посвящен влиянию параметров разрежения и гравитации на теплопередачу между параллельными пластинами; задача решалась упомянутым выше методом.

Аналогичный метод был применен американцами Бьенковским, Мак-Кинли и Сискиндом к задачам о гиперзвуковом течении бинарной смеси возле осесимметричного тела. Тот же метод применили Фогениц и Такета (США) к еще более сложной задаче об обтекании тупоносого тела при его входе в атмосферу. Эти авторы сравнили свои результаты с соответствующими решениями уравнений Навье — Стокса, причем оказалось, что последние могут приводить к существенным ошибкам даже при малых числах Кнудсена. Уотсон (США) применил метод Берда к решению задачи о движении частиц плазмы в ускорителе при наличии магнитного поля. Некоторые недостатки работы отмечены самим автором, но результаты в целом производят внушительное впечатление. Оригинальную разновидность того же метода предложил Иосидзава (Япония), рассмотревший структуру потока вблизи острой передней кромки пластины. О точности полученного решения судить трудно ввиду ряда существенных ограничительных предположений.

Продолжают совершенствоваться и другие численные методы. Так, Хуан, Хванг и Гидденс (США) дали в своем докладе достаточно подробное описание развиваемого и применяемого ими метода дискретных ординат. На симпозиуме они рассмотрели применение этого метода к различным задачам о движении двухатомного газа, а также плазмы. Метод, несколько отличающийся от упомянутого выше и названный авторами методом конечных элементов, был описан в докладе Агирре-Рамиреса, Одена и Ву (США) и применен к анализу нестационарного течения Куэтта.

В докладе Мэсона и Чу (США) описывается разработанный ими численный метод «частиц в ячейках», предназначенный в первую очередь для решения многомерных задач. В докладе приводятся некоторые примеры: импульсивное движение поршня, задача Римана и др.

Фундаментальной работой является доклад Хикса и Йена (США), в котором при помощи метода Монте-Карло рассматриваются интегралы столкновений нелинейного уравнения Больцмана и на примере двух задач (ударная волна и одномерная теплопередача) выясняется степень точности, достигаемая при приближенных представлениях интеграла столкновений по модели Крукса и по методу Мотт-Смита в различных областях фазового пространства. В этом докладе исследовано и влияние ряда других параметров.

Нарасимха, Дешпанде и Субба Раджу (Индия) представили доклад о численном расчете интегралов столкновения, основанный на возможности интегральной аппроксимации функции распределения.

Интерес участников вызвал доклад И. Н. Лариной, Е. Ф. Лимара, В. А. Рыкова, Е. М. Шахова и Ф. Г. Черемисина с обзором работ группы, занимающейся вопросами динамики разреженных газов в Вычислительном центре АН СССР. Были описаны различные методы, численные решения ряда задач и т. п. Большинство работ этой группы было опубликовано в Изв. АН СССР, МЖГ и в других советских научных изданиях.

Ряд экспериментальных исследований, проведенных под руководством известного специалиста Богдонова (США) и его учеников (например, Вас и Заккей), был посвящен течению в окрестности передней кромки пластины и вершины конуса в гиперзвуковом потоке. Числа Маха при этом были порядка 25, эксперименты проводились в аэродинамических трубах низкой плотности с графитовыми подогревателями, велись тщательные измерения при помощи электронных пучков, термоанемометров и датчиков поверхностного давления.

Весьма обстоятельные эксперименты в аэродинамической трубе с дуговым подогревателем были описаны Беккером, Папаникасом и Швейгером (ФРГ). Ими было рассказано об исследовании поля течения перед полусферой в переходном режиме и в режиме образования ударной волны. Об измерениях сопротивления сферы в свободных струях при числах Маха порядка 10 и в широком диапазоне чисел Кнудсена было рассказано также в докладе Легге и Коппенвальера (ФРГ).

Американские исследователи Кил, Культо и Запата (США) доложили об экспериментальных исследованиях сопротивления конуса в гиперзвуковом потоке при числах Кнудсена от 0.04 до 2.6. Эксперименты проводились в свободной струе азота.

Алофс и Спрингер (США) сообщили о проведенных ими весьма обстоятельных исследованиях плоского и цилиндрического течения Куэтта в широком диапазоне параметров при помощи электронно-пучковой диагностики.

В докладе Кроу, Бэбкока и Уиллоуби (США) было рассказано об экспериментах по измерению коэффициента сопротивления малых частиц (несколько микрон в диаметре) при малых числах Маха и разнообразных числах Кнудсена. Эксперименты проводились на оригинальной микробаллистической установке.

Ряд экспериментальных исследований, сообщения о которых делались на симпозиуме, был посвящен исследованию струй низкой плотности и расширения газа в вакууме. Наиболее интересными представляются сообщения Р. Г. Шарафутдинова (СССР), Шюгерля (ФРГ), Гаспанна и Крига (ФРГ), А. А. Бочкарева, А. К. Реброва, С. Ф. Чекмарева и Р. Г. Шарафутдинова (СССР).

Несколько докладов на симпозиуме было посвящено вопросам экспериментальной техники и методики измерений. Можно отметить доклады Скотта и Минцера (США), Джорда (Англия), Мунца и Магуайра (США), Тальбота, Фрзера и Роббена (США). Основные проблемы в этом направлении связаны с применением и развитием электронно-пучковой диагностики.

Два доклада на симпозиуме были посвящены исследованию структуры верхней атмосферы Земли по данным о торможении спутников. Один из таких докладов был сделан хозяевами симпозиума — итальянцами (докладчик Л. Брوليو). В докладе приводятся данные по измерению плотности атмосферы Земли в экваториальной плоскости по торможению итальянского спутника Сан-Марко II в области высот 200—400 км от поверхности Земли. Основное внимание в эксперименте уделялось временным вариациям плотности атмосферы. Было показано, что существующие модели верхней атмосферы не соответствуют действительности во время сильных геомагнитных бурь. Здесь следует заметить, что на симпозиуме имела место дискуссия по поводу вычисления коэффициента сопротивления (тесно связанного с коэффициентом accommodation), величина которого закладывается в расчет плотности атмосферы по данным о торможении спутника.

Для известной американской программы «Одиссей», по которой запускаются одновременно несколько спутников на близкие орбиты для одновременного измерения коэффициента accommodation и распределения плотности атмосферы, выполнена работа, доложенная Г. Карром и С. Йеном (США). Эта теоретическая работа, в которой анализируются аэродинамические свойства вращающихся выпуклых тел в свободномолекулярном потоке, важна как для проектирования космических аппаратов, так и для интерпретации данных по торможению спутников.

Как и на предыдущем симпозиуме, был представлен ряд докладов, относящихся к исследованию следа за обтекаемым телом, движущимся в ионосфере. При этом основная часть докладов относится к лабораторному моделированию обтекания спутника разреженной плазмой. Особое значение авторами этих докладов придается сравнению теории и эксперимента (например, доклад американских ученых А. Солина и И. Вудрофа).

У. Самир и Г. Ренн (США) представили результаты обработки экспериментов по измерению распределения параметров ионосферы вблизи космических аппаратов (Эксплорер-31, Ариел I, Джемми). Найдено, что отношение электронного тока на зонд в следе к электронному току впереди обтекаемого тела увеличивается с высотой.

Профессор Р. Вальо-Лаурин (США) в своем обзорном докладе на пленарном заседании подверг тщательному анализу проблему обтекания разреженной плазмой тел, летящих в ионосфере. Им были проанализированы как теоретические, так и экспериментальные (лабораторные и в космическом пространстве) вопросы этой области исследований для больших и малых тел при различных соотношениях между характерными длинами. Профессор Р. Вальо-Лаурин отметил, что эта проблема имеет два аспекта: вычисление аэродинамических сил, действующих на спутники, а следовательно, вычисление эволюции их орбиты и вопросы, связанные с распространением электромагнитных сигналов через область плазмы, возмущенную движущимся космическим аппаратом.

Несколько докладов было посвящено обтеканию планет солнечной системы межпланетной плазмой. Так, например, в обзорном докладе профессор Б. Бертоцци (Италия), охарактеризовав в общих чертах динамику межпланетной плазмы, подробно остановился на взаимодействии солнечного ветра и магнитного поля Земли. При этом особое внимание в докладе уделялось проблеме образования бесстолкновительной ударной волны, ее структуре, отличию от обычных столкновительных ударных волн и наблюдению ее при помощи космических аппаратов. В докладе хорошо представлены результаты измерений электрического и магнитного полей на американских спутниках ОГО-5, Вела 3В, Вела 4В, указывается на турбулентную структуру бесстолкновительной ударной волны около Земли.

Обтеканию Луны солнечным ветром был посвящен доклад И. Вэнга (США), который в приближении ведущего центра рассмотрел обтекание «цилиндрической» Луны (это приближение, очевидно, справедливо вблизи ее экваториальной плоскости). Результаты теоретических расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными на космическом аппарате Эксплорер-35. Указывается на их хорошее

согласование. В частности, в области полутени получается возрастание, а в области тени уменьшение магнитного поля по сравнению с межпланетным.

В. Б. Баранов (СССР) в своем докладе рассмотрел вопрос об опрокидывании волн Римана в бесстолкновительной плазме с анизотропным давлением на основе гидродинамических уравнений Чу, Гольдбергера и Лоу.

Подавляющая часть докладов, представленных на симпозиуме, была посвящена проблеме взаимодействия атомов и молекул газа с твердыми поверхностями. Из экспериментальных работ здесь следует отметить работу канадских ученых Е. Москаля и Дж. Френча, в которой исследуется перенос нормального импульса частиц на вольфрамовую поверхность при помощи моноэнергетических пучков нейтральных молекул гелия и аргона. Энергия частиц аргона 0.06—0.53 эв. Пучки получались газодинамическим методом, а измерения проводились при помощи чувствительных микровесов. Для измерения потоков молекул использовался масс-спектрометр.

В докладе югославских ученых И. Кушера и в других докладах с его участием предпринимается попытка теоретического построения граничного условия на твердой поверхности для функции распределения частиц по скоростям. Строится интегральное соотношение с ядром, свойства которого исследуются.

Ряд докладов был посвящен квантовой теории вычисления коэффициентов аккомодации. Из этих работ необходимо отметить работу Ф. Гудмена (Канада), в которой предлагается трехмерная теория, дающая, как указано автором доклада, лучшее совпадение с различными экспериментальными результатами.

Оригинальной по своей постановке является работа М. Басби и Р. Брауна (США) «Экспериментальное изучение рассеяния аргоновых молекулярных пучков на твердой поверхности», в которой поверхность мишени создается в ходе эксперимента. Получены данные по пространственным характеристикам рассеяния. Здесь следует, однако, отметить, что достоинства работы снижены отсутствием данных о кристаллической структуре аргонового криосоадка на поверхности мишени.

В работе американских ученых М. Шеера, Р. Клейна и Дж. Мак-Кинли экспериментально исследуется взаимодействие атомов лития с молибденовой поверхностью. Определяются параметры десорбции, на основе которых строятся потенциалы взаимодействия атомов и ионов лития с молибденовой поверхностью.

Весьма содержательный обзор последних достижений теории взаимодействия атомов газа с твердыми поверхностями был дан в докладе Ф. Гудмена (Канада).

В своем докладе на пленарном заседании профессор Л. Триллинг (США) использовал сравнительно простую феноменологическую модель для описания экспериментальных результатов по рассеянию инертных газов на твердых поверхностях. Эта теория сравнивается с результатами экспериментов по рассеянию как моноэнергетических пучков, так и пучков, в которых распределение частиц максвелловское. При этом используются данные по рассеянию аргона, криптона, ксенона на вольфраме, серебре, платине, золоте и никеле при углах падения атомов 30—80°, энергиях 0.03—1.5 эв и температурах поверхности 443—2100° К. Сравнение проводилось для величины $\Delta\theta$ отклонения максимума индикатриссы рассеяния от зеркального угла. Получено согласование с точностью $\pm 2^\circ$ при значениях $\Delta\theta$ до 20°.

В. Б. Баранов, В. П. Шидловский

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ АН СССР СЕМИНАРЫ¹

Общий семинар Института проблем механики АН СССР под руководством А. Ю. Ишлинского.

Шестидесять восьмое заседание 19 II 1970 г. Ю. П. Райзер (Москва) *Дозвуковой режим распространения разряда и «световой плазмотрон».*

Для получения плазмы используются высокочастотные (~ 10 Мгц) и сверхчастотные (~ 3000 Мгц) плазмотроны. Вместе с тем заманчиво иметь световой плазмотрон, в котором плазма создается и поддерживается лучом лазера, и не нужны средства транспортировки электромагнитной энергии. В световом плазмотроне происходит нагрев газа за счет поглощаемой энергии излучения. Поглощение энергии возрастает с увеличением степени ионизации газа, а степень ионизации возрастает с увеличением температуры. В результате возникает температурно-ионизационная вол-

¹ Подробности о содержании семинаров, отмеченных звездочкой, см. в журнале «Механика твердого тела», 1971, № 1.