

ных методов, опубликованных в 11 главе монографии Г. И. Марчука и В. И. Лебедева*; высказана гипотеза о том, что при решении задачи итерационным методом с затратой наименьшего числа действий для повышения точности требуется усложнение конструкции итерационного метода. Поэтому можно высказаться за решение сложной задачи по иерархической структуре КР — метода, так как на этот путь указывает сам ход применения численных методов к решению все усложняющихся задач и процесс постепенного накопления отработанных программ для более простых задач.

В докладе И. Бабушки и Р. Келлога (США) для двумерного уравнения диффузии с кусочно постоянными коэффициентами, заданными в прямоугольнике, предложен вариационно-разностный метод, в котором конечные функции учитывают особенности поведения решения в точках пересечения линий разрывов коэффициентов; получены оценки погрешности в энергетической норме. А. Хенри (США) предложил методы получения коэффициентов разностных уравнений повышенной точности, аппроксимирующих многогрупповые диффузионные уравнения; им были рассмотрены метод конечных функций, нелинейный метод, включающий итерационный процесс поправки коэффициентов, и гибридный метод. А. Биркгофер и В. Вернер (ФРГ) сообщили о методе переменных направлений для решения двух групповых диффузионных уравнений. Рассматривались синтетические методы. В случае, когда они основаны на применении координатных функций из области определения оператора обобщенной задачи, синтетические методы являются разновидностью методов Галер-

кина и Канторовича. В докладе В. Стэси (США) развит эвристический подход к построению общего вида функционалов, на основе которых выводятся уравнения синтетических методов; при этом не предполагается, что координатные функции должны лежать в области определения оператора задачи, т. е. быть, например, непрерывными, удовлетворять краевым или начальным условиям и т. д. Строгого обоснования такого формализма нет.

Р. Фрелих (ФРГ) оценил время расчета реакторов методом сеток, которые показывают, что современное состояние вычислительной техники еще не позволяет широко использовать метод сеток для расчета трехмерных задач. Р. Фрелихом дано общее определение синтетических методов для задач, записанных в дискретной форме. Оно совпадает с определением, данным обобщенному методу Галеркина. В нескольких теоремах сформулированы достаточные условия, при выполнении которых первое собственное значение и функция приближенных уравнений положительны. На конкретных примерах описаны различного рода аномалии синтетических методов. Дж. Эскью (Англия) рассмотрел методы решения уравнения Пайерлса для расчета двумерных ячеек и задачу о граничных условиях; отмечено, что интегральные методы требуют запоминания полной матрицы системы сеточных уравнений, а это является серьезным препятствием для применения интегральных методов к трехмерным задачам. Ф. Шмидт (ФРГ) перечислил задачи, для решения которых в настоящее время целесообразно использовать метод Монте-Карло; такими оказались задачи для определения некоторых функционалов или многомерные задачи, для которых еще не развиты сеточные методы.

Труды семинара будут опубликованы МАГАТЭ в течение шести месяцев.

В. И. ЛЕБЕДЕВ

* Г. И. Марчук, В. И. Лебедев. Численные методы в теории переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1971.

Об исследованиях турбулентного нагрева плазмы в США

В соответствии с соглашением между Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР и КАЭ США об обмене специалистами по турбулентному нагреву плазмы с 30 июня по 15 июля 1971 г. в США находилась группа советских специалистов в составе С. Д. Фанченко, Б. А. Демидова, В. А. Супруненко. Ответная группа специалистов США была принята в СССР в октябре 1970 г.

Советская делегация познакомилась с последними достижениями в области плазменных исследований, представленными на Гордоновскую исследовательскую конференцию, посетила основные американские экспериментальные установки по турбулентному нагреву плазмы и некоторые установки для получения сильноточных пучков релятивистских электронов.

В 1971 г. ежегодная Гордоновская исследовательская конференция по физике плазмы проводилась на тему «Фундаментальные свойства плазмы, их теория и использование в диагностике плазмы». Председателем был видный теоретик проф. Х. Драйсер, вице-председателем — известный специалист в области турбулентного нагрева проф. Ч. Уортон. В центре внимания находились коллективные взаимодействия в плазме, теория турбулентного нагрева и диагностика нелинейных явлений в плазме.

Гордоновские конференции довольно необычны по форме и напоминают скорее научные семинары или школу физиков. Число участников не более 100, все заседания пленарные, доклады не публикуются, на сообщаемую информацию не допускается ссылок в печати. Доклады не ограничиваются строго во времени, аудитория может задавать вопросы, перебивая докладчика. Организаторы конференции считают своей задачей поставить очень ограниченное число докладов (не более двух-трех на заседании), но зато возможно подробнее разобрать каждую из затронутых тем на основе широкой дискуссии. С докладами на конференции 1971 г. выступили видные специалисты по турбулентному состоянию, ВЧ- и турбулентному нагреву и диагностике плазмы из США, ФРГ, Японии и других стран. Конференция прошла на высоком научном уровне и внесла значительный вклад в понимание коллективных взаимодействий в плазме.

Явление турбулентного нагрева плазмы было обнаружено и исследовано в Советском Союзе в 1961—1965 гг. Е. К. Завойским с сотрудниками в Москве и Я. Б. Файнбергом с сотрудниками в Харькове. Турбулентным нагревом называется явление не связанного с парными столкновениями нагрева плазмы электрическим током, когда ток возбуждает в плазме мелко-масштабную турбулентность. В результате взаимодей-

ствия частиц с плазменными колебаниями сопротивление плазмы и нагрев значительно превышают значения, обусловленные парными столкновениями.

В самых первых советских опытах турбулентный нагрев осуществлялся током, протекавшим поперек магнитного поля в интенсивной волне в плазме. В дальнейшем в Москве и Харькове был детально исследован турбулентный нагрев током, идущим вдоль магнитного поля в прямолинейных и тороидальных магнитных ловушках*.

В США первые опыты по турбулентному нагреву были начаты в 1965—1966 гг., причем подтвердились основные особенности, ранее установленные в СССР. С тех пор американская программа исследования турбулентного нагрева получила широкий размах. Теория развивается У. Драммондом и др. в Техасском университете, Дж. Даусоном и др. в Принстоне, Р. Морзе и др. в Лос-Аламосе, Б. Фридом и др. в Калифорнийском университете, Б. Коппи и др. в Массачусетском технологическом институте. Основные экспериментальные исследования проводятся в четырех научных центрах (Корнельском, Техасском, Мерилендском университетах и в Ок-Ридже) по четко разграниченным научным направлениям.

В Корнельском университете (Итака, шт. Нью-Йорк) работы проводятся под руководством Ч. Уортона на экспериментальной установке ТН-М-3. Она того же типа, что и советские установки серии ТН («Турбулентный нагрев»), исследуемые в ИАЭ им. И. В. Курчатова, но отличается методом приготовления плазмы и значительно большей индуктивностью контура тока турбулентного нагрева. Вместо титан-гидридных инжекторов в ней применяются коаксиальные инжекторы плазмы. Турбулентный нагрев плазмы плотностью $(2 \div 8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ проводится током, протекающим вдоль поля в магнитной ловушке пробочной конфигурации. Показано, что во время турбулентного нагрева сопротивление плазмы аномально велико, причем наблюдаются интенсивные турбулентные флюктуации, в спектре которых преобладают ионно-звуковые колебания. Распределение ионов двухтемпературное со средней энергией $1,5 \text{ кэВ}$; температура электронов $\sim 6 \text{ кэВ}$; отношение токовой скорости электронов к скорости ионного звука составляет 2—5. Все эти данные хорошо подтверждают результаты, полученные ранее в Москве и Харькове. Вместе с тем на установке ТН-М-3 еще до турбулентного нагрева наблюдаются интенсивные флюктуации плазмы на ионно-циклотронных частотах, сопровождаемые аномальным сопротивлением плазмы. Подробно исследуется переход от фазы активного турбулентного нагрева к фазе удержания нагретой плазмы. Весьма интересны результаты измерений аномальной проводимости плазмы с помощью оригинальной методики радиочастотного зонда, работающего по принципу Q-метра. Лаборатория Ч. Уортона является ведущим научным центром по физике турбулентного нагрева в США. В настоящее время в ней проводится широкий цикл исследований турбулентного состояния плазмы, для чего используется прекрасно отработанная методика комбинационного рассеяния на плазме микро-

радиоволн и подготавливается методика рассеяния субмиллиметровых волн, генерируемых циановым лазером. Лаборатория работает в тесном контакте с теоретиками.

Большие работы по получению высокотемпературной плазмы методом турбулентного нагрева ведутся в Техасском университете. Там организован Центр плазменных и термоядерных исследований. Под руководством А. Робсона создается крупный токамак с турбулентным нагревом плазмы (под названием ТТТ). Большой диаметр тороидальной разрядной камеры равен 120 см , малый 20 см , магнитное поле 35 кэВ , напряжение обхода для турбулентного нагрева до 500 кВ , время нагрева порядка 1 мксек . Во время посещения нашей делегацией установка находилась в стадии монтажа. В той же лаборатории проводятся эксперименты по косым ударным волнам, проницанию быстрого переменного магнитного поля в плазму, взаимодействию слабого пучка электронов с плазмой.

В Мерилендском университете под руководством Х. Грима и А. де-Сильвы экспериментально исследуется турбулентный нагрев плазмы током, текущим поперек магнитного поля. Здесь впервые в США методом лазерного рассеяния был подтвержден эффект бесстолкновительного нагрева плазмы в условиях турбулентного нагрева волной, а также впервые экспериментально наблюдался эффект появления сателлитов запрещенных линий гелия в турбулентной плазме.

В Ок-Риджской национальной лаборатории опыты по турбулентному нагреву плазмы проводятся А. Алексеевым. Обнаружен новый механизм турбулентного нагрева ионов во вращающейся плазме.

В последнее время большой интерес в США вызывает возможность нагрева плотной плазмы релятивистскими пучками электронов. Наши специалисты ознакомились с экспериментами по получению сильноточных пучков релятивистских электронов в Корнельском университете и Военно-морской исследовательской лаборатории. В развитии техники пучков релятивистских электронов достигнуты значительные успехи: получены пучки с током в импульсе порядка 1 Ма , энергией электронов порядка 1 МэВ и полной энергией 10^4 — 10^6 Дж . продемонстрирована возможность фокусировки пучков в нарастающих магнитных полях и сделаны первые попытки свести несколько пучков на одну мишень.

Турбулентный нагрев в «традиционных» вариантах и турбулентный нагрев релятивистским пучком электронов признаются в США весьма перспективными подходами к решению проблемы управляемой термоядерной реакции. Фронт работ в этих направлениях быстро расширяется и уже получены многообещающие результаты. В физике турбулентного нагрева основное внимание уделяется детальному исследованию механизма нагрева ионов и величины аномальных потерь. Вместе с тем большие средства вкладываются в строительство крупных магнитных ловушек с турбулентным нагревом плазмы.

Программа работы группы советских специалистов, составленная КАЭ США в соответствии с пожеланиями советской стороны, была полностью выполнена. Хотелось бы надеяться, что состоявшиеся научные дискуссии будут способствовать международному сотрудничеству в исследовании проблемы управляемого термоядерного синтеза.

С. Д. ФАНЧЕНКО

* «Атомная энергия», 14, 56 (1963); 23, 417 (1967).