

А. А. Самарский.

"Вычислительный эксперимент в физике плазмы —
итоги за год и перспективы".

Слова "Численный эксперимент" и "математические модели" стали весьма и весьма популярными. "Математические модели" существуют в экономике, биологии и др. науках; нас интересуют, конечно, модели в области физики и их исследование методами численного эксперимента.

Хотя интерес к численному эксперименту неуклонно повышается, мне все время приходится подчеркивать, выступая перед физиками, что численный эксперимент проводится не только для математиков, а прежде всего для физиков. Поскольку это численный эксперимент в области физики, то в его проведении должны участвовать и физики, ибо без понимания су- и рассматриваемой задачи трудно найти эффективный, разумный и быстро приводящий к цели численный метод.

Постановка вопроса о численном эксперименте порождает ряд проблем. Это прежде всего выбор математической модели и ее "физического оснащения". Выбор математической модели это, по существу, выбор физического приближения. Физики всегда имеют дело с приближениями — отбрасывают какие-то факты, связи, пренебрегают какими-то силами и выбирают основные, которые должны определять течение исследуемого процесса.

Это физическое приближение должно быть сформулировано в математических терминах, написаны уравнения, поставлены все дополнительные условия, необходимые для решения задачи.

Теперь о "физическом оснащении". Речь идет о том, что диффе-

ренциальные и интегральные уравнения, описывающие задачу, содержат некоторые коэффициенты — теплопроводности, электропроводности, вязкости и т.д. Необходимо также задать уравнения состояния. Когда мы начинаем проводить численные эксперименты для конкретных веществ и условий с целью дать объяснение реальным физическим экспериментам, мы неизбежно приходим к тому, что "физическое оснащение" должно быть выполнено на достаточно хорошем уровне.

Таким образом, численный эксперимент стимулирует развитие фундаментальных исследований для получения пробегов, сечений, уравнений состояния и других характеристик вещества. С этим делом обстоят плохо. Мало физиков занимаются изучением указанных характеристик свойств вещества.

Работы по изучению сечений, констант физических реакций должны быть тесно связаны с численным экспериментом. Во многих случаях возникают обратные задачи математической физики. Здесь приходится восстанавливать коэффициенты дифференциальных уравнений.

Необходимость проведения численного эксперимента, который стыковался бы с реальным экспериментом, порождает и другую проблему.

Состоит она в том, что стремление построить хорошую математическую модель, учитывающую многие эффекты, которые раньше не учитывались, приводит к тому, что мы получаем математические задачи невиданной доселе сложности. Необходимо эти задачи исследовать математическими средствами. Это уже "привилегия" собственно математиков — специалистов в области дифференциальных и интегральных уравнений.

Интересно отметить, что математики — специалисты по дифференциальным и интегральным уравнениям, очень неохотно занимаются ис-

следованием тех уравнений, которые появляются в физике плазмы.

Могу привести пример — уравнение Власова. Оно написано очень давно. До последнего времени остаются невыясненными некоторые математические вопросы, относящиеся к уравнению Власова. Лишь в этом году А.А.Арсеньевым доказана теорема существования и единственности для многомерного уравнения Власова. (работа еще не опубликована). Для решения уравнения Власова применяются некоторые численные методы типа метода "больших молекул", являющиеся различными способами дискретизации среды. При этом позволительно задать вопрос: "Насколько надежен этот метод, есть ли уверенность в том, что увеличивая число "больших молекул" мы будем стремиться к точному решению?" Это может быть в том случае, если есть уверенность в корректности задачи, то есть непрерывной зависимости решения от входных данных. Отсюда ясно, насколько важным является изучение математических моделей, как уравнений математической физики. Оно, вообще говоря, должно предшествовать применению численных методов.

Можно привести в качестве второго примера уравнения газовой динамики, самой "банальной" одномерной газовой динамики, не говоря уже о магнитной гидродинамике с учетом диссипативных процессов и двухтемпературности. В этом случае получается чрезвычайно сложная система нелинейных уравнений, которая, в зависимости от условий, допускает существование очень сложных решений, необычайно сложных структур. Математические исследования в этой области находятся в зачаточном состоянии.

Тем не менее, все эти задачи решаются. Есть уверенность, что уравнения магнитной гидродинамики в той области, в которой мы их используем правомерны. В этом нас убеждает сравнение с экспериментами, которые проводились в последнее время. Оно связано с исследованием Т-слоя. Об этих экспериментах будет сказано в докладе

Ю.П.Попова. У нас есть уверенность в том, что эти уравнения действительно отражают реальность. Тем не менее здесь есть огромное поле деятельности для собственно математических исследований, в частности, в связи с проблемой вязкости и псевдовязкости.

Все эти проблемы связаны с разработкой численных алгоритмов. Здесь тоже колоссальное поле деятельности и бездна трудностей. Трудности связаны с тем, что процессы, описываемые уравнениями магнитной гидродинамики, существенно нелинейны, возможно существование режимов с большими градиентами, множества сильных разрывов разных типов (о слабых разрывах мы уже не говорим, это так сказать мелочь). На практике при использовании разностных методов мы вынуждены ограничиваться грубыми сетками с не очень большим числом узлов. Даже на современных машинах мы не можем позволить себе роскоши считать слишком подробно, так как задачи очень трудоемки, а решение надо получить быстро. Отсюда, требование к алгоритмам — в грубом приближении должна быть достигнута точность, достаточная для того, чтобы правильно передать основные свойства процесса. При переходе от дифференциальных уравнений к разностным, т.е. при замене непрерывной среды дискретной, порождаются паразитические эффекты, связанные с появлением фиктивных источников и стоков. Нужно искать такие дискретные модели, которые с достаточной точностью отражали бы основные свойства сплошной среды. Это интересная, большая проблема, которой мы занимаемся. Ее решение мы ищем, исходя из требований, чтобы разностные схемы обладали теми же законами сохранения, которые характерны для непрерывной среды. (Я не говорю здесь о том, что на самом деле реальная среда дискретна, что само описание в рамках сплошной среды есть приближение. Здесь речь идет о разных дискретностях).

Далее имеется много вопросов, связанных с проведением расче-

тов, с обработкой колоссальных массивов информации. Требуется не только разработка алгоритмов, но и существенное улучшение вычислительной техники. В частности, необходимо расширить работу по улучшению внешних устройств, графикопостроителей, дисплеев. Нами изготовлены некоторые киноиллюстрации, в частности для задачи о сравнении эксперимента по T-слою и численного расчета. Важно отметить, что использование киноиллюстраций существенно для более тонкого анализа динамики сложных процессов в плазме.

Наконец, следующее большое направление деятельности — это анализ результатов, пересмотр и уточнение модели.

Здесь физика и математика переплетаются очень тесно и я хочу еще и еще раз подчеркнуть, что речь идет о физике и математике, а не о физиках и математиках. Существует мнение среди физиков, что ЭВМ, расчет — дело математиков. Математики считают, а мы посмотрим. Это предрассудок и с ним надо бороться. Предрассудки часто связаны с непониманием, с отсутствием достаточной информации, подготовки, с трудностями пересмотра уже сложившихся представлений о характере теоретической работы в физике.

Речь идет не о чем-то, противоречащем стилю работы, привычному для физика, а о том, что в руки физиков поступает новое средство исследования. Ничего не отменяется. Все традиционные, сложившиеся десятилетиями методы, приемы остаются — размерностный анализ, линеаризация, автомодельность, методы разделения переменных, методы возмущений и т.д. Все эти средства, которые призваны для того, чтобы получить первичную информацию о характере изучаемого процесса, обязательно используются и только после этого вступает в действие "тяжелая артиллерия" — численные методы.

Еще несколько слов о "математических моделях". На самом деле ничего нового в этом термине нет. Физики всегда в своих тео-

риях использовали их на том уровне, на котором позволяло им их личное математическое оснащение. Один ученый сводит задачу к обыкновенным дифференциальным уравнениям, другой к алгебраическим, если это возможно. Разработана колоссальная линейная теория в физике плазмы. И имел, прежде всего, в виду теорию устойчивости. Это широкое и сложное поле деятельности. Но этого недостаточно. Численные методы позволяют решать задачу "в лоб". После того, как отлажена грубая модель, скажем на языке обыкновенных дифференциальных уравнений, ее можно использовать для исследования зависимости от различных параметров. Системы уравнений очень сложные и надо сказать, что где-то уже виден потолок, определяемый, по-видимому, уравнением Больцмана. Необходимо, чтобы наряду с уточнением физических моделей, использующих полное описание, велась работа по построению грубых моделей, основанных на более точных. Как правило, физики, работающие в области вычислительного эксперимента, так всегда и делают. Все задачи, с которыми нам приходится иметь дело — многопараметрические и одна из основных проблем в вычислительной физике — это многопараметрическая оптимизация. Эту задачу трудно выполнить, не имея в качестве подсобных средств грубых моделей.

Отметим еще одну сторону. Мы всегда начинаем изучать влияние различных эффектов в возможно простой ситуации. Здесь возможны два параллельных направления — решение, скажем, одномерных задач с наиболее полным учетом физических эффектов и решение двумерных и трехмерных задач с учетом основных физических эффектов для выяснения влияния геометрии.

Мне хотелось бы сказать, что в ряде случаев целесообразно ставить одномерный физический эксперимент. В других случаях — двумерный численный эксперимент. Иногда для выяснения физического эффекта "в чистом виде" нужно ставить физический эксперимент таким

образом, чтобы расчет был возможно проще. Методики расчета создаются годами, с большими усилиями иногда в условиях нехватки машинного времени.

Я считаю, что это тот случай, когда много раз надо говорить одно и то же. Сдвиги пока крайне незначительны. Одна из основных причин та, что физики не пошли еще массами в вычислительную математику. Нужна такая ситуация, чтобы физик понял, что ему "идеться" некуда и что он сам должен заниматься численным экспериментом. Такая ситуация складывается и в конце концов сложится. Постановка и планирование физических экспериментов немислимы, по-существу, без предварительных численных экспериментов, указывающих область физических параметров, в которой надо работать. Кроме того, необходимо обрабатывать результаты физического эксперимента. Сейчас это одна из центральных проблем в физике. Имеется немало примеров, когда колоссальная информация пропадала впустую. Таким образом, физический и численный эксперименты тесно связаны.

Теперь я расскажу о некоторых работах прошедшего года. Как известно, в 1972 году стали известны ряд вычислительных работ по лазерному термояду, проводимых в США. Простейшей задачей лазерного термояда является задача обжатия капли из дейтерия и трития лазерным излучением. Нужно найти режим, при котором будет максимальное сжатие и высокая температура, так что могут возникнуть условия для инициирования термоядерной реакции. Это интересная, многопараметрическая задача. Она прорабатывалась как в одномерном, так и в двумерном приближении. Следует отметить, что при лазерном обжатии возникают интересные режимы и структуры в плазме.

Работа в области УТС ведется по нескольким направлениям, так как сейчас существует много физических проектов. Они имеют равные права на существование, подлежат исследованию и сопоставлению.

Я имею в виду лазерный термояд, Z и Θ -пинчи, электронные релятивистские пучки. С проблемой УТС связана утилизация энергии при помощи МГЦ-преобразования.

В настоящее время мы переживаем "третий период" в развитии работ по УТС. Большие успехи были достигнуты на Токамаках. Есть также, как я уже говорил, другие проекты. Необходимо решить вопрос о направлении исследований, для этого нужен анализ с помощью численного эксперимента. Это тот случай, когда без численного эксперимента нельзя разумно решать вопрос о капиталовложениях, строительстве машин, установок и т.д.

В начале мы ставим тот или иной проект в благоприятные условия и решаем вопрос о принципиальной возможности его осуществления. Затем учитываем отрицательные эффекты, например, двумерность или прогрев ядра мишени быстрыми электронами.

С проблемой лазерного термояда связаны вопросы получения рабочих веществ, накачки лазеров и т.д. В прошлом году мы говорили о работах по сильноточному разряду, который можно использовать для накачки лазеров. Работы здесь продолжаются.

Я уже говорил о "физическом оснащении" — уравнениях состояния, транспортных коэффициентов в плазме, составлении атласов.

Имеет смысл поговорить о структурах, которые возникают в плазме, об их общих свойствах, так как мы имеем дело с плазмой почти во всех задачах.

Во-первых эти задачи нелинейны, причем нелинейны как сами уравнения так и коэффициенты, входящие в них. Благодаря этому проявляется возможность получения новых физических режимов. Одним из таких режимов является температурная волна, впереди которой идет ударная волна.

Другим режимом является, например эффект T -слоя. Это — нели-

нойная, самоподдерживающаяся, устойчивая структура. Она обусловлена перегретой неустойчивостью и образуется в результате преимущественного нагрева некоторой массы вещества электрическим током. Для образования и поддержки T-слоя необходимо выполнение ряда локальных условий.

Этот эффект был обнаружен нами при изучении взаимодействия плотной плазмы с магнитным полем, детально исследован в результате проведения многих численных экспериментов и зарегистрирован в качестве теоретического открытия. Одним из первых вопросов по поводу T-слоя был такой: почему физики не заметили его в своих экспериментах, если он существует? Дело в том, что T-слой существует в области, довольно труднодоступной для физического эксперимента. Кроме того, неясно априори что искать и где искать? Значит, сама по себе традиционная постановка — если что-то есть, то оно должно быть обнаружено экспериментально, нуждается в пересмотре. В связи с обнаружением в расчетах T-слоя было проведено всестороннее изучение точности вычислений, а также построены автономные решения, содержащие T-слой. Были найдены условия возникновения и развития T-слоя.

В нескольких лабораториях страны проводились работы по экспериментальному обнаружению T-слоя. В частности, в лаборатории В.Д.Письменного в ИГУ, были получены подтверждения существования структур, содержащих T-слои. Причем не один, а несколько T-слоев. Они были обнаружены в условиях, предсказанных теоретически. Об этом более подробно будет рассказано в докладе Ю.П.Попова.

T-слой обнаружен во многих задачах, в частности, в задачах связанных с УТС. Он является устойчивой и распространенной структурой, которая может определять физические объекты, протекающие в плазме. Проблема состоит в том, чтобы уловлять такими структу-

рами для получения нужных режимов. Например, в процессе обжата дейтериево-тритиевой капли лазерным лучом, большую роль играет реализация режима температурной волны второго рода, о которой я говорил выше. Такой режим необходим для получения высоких плотностей.

Отмечу, что в связи с этим, у нас в отделе С.П. Курдюмовым и Н.В. Змигренко была проведена теоретическая работа по исследованию автомодельных режимов. В частности, ими было показано существование режимов с неподвижной по массе температурной волной. Было показано, что принципиально возможно обжатие в любое заданное число раз. Интересно, что автомодельное решение было построено с реальными коэффициентами, входящими в уравнения и при учете большого числа физических процессов. Я считаю, это большой успех: теоретическими средствами оказалось возможным смоделировать такую сложную задачу. Результаты, свидетельствующие о получении больших плотностей в капле дейтерия-трития с помощью режима температурной волны второго рода, подтверждаются теоретически.

Я затронул общие вопросы, более конкретно результаты будут представлены в специальных докладах.

Благодарю за внимание.

ИПМ АН СССР, г. Москва.