



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 55 за 2013 г.



Чуянов В.А.

Первые программы расчета
ядерных реакторов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Чуянов В.А. Первые программы расчета ядерных реакторов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 55. 12 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-55>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

В.А. Чуянов

**ПЕРВЫЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Москва — 2013

Чуянов В.А.

Первые программы расчета ядерных реакторов

Работы по расчету ядерных реакторов в Отделе кинетических уравнений ИПМ им. М.В. Келдыша велись под руководством Е.С. Кузнецова в 1953-1966 годах с участием Т.А. Гермогеновой, М.В. Масленникова, В.А. Чуянова, Л.В. Майорова, О.Б. Москалева, И.Г. Крутиковой, А.В. Воронкова.

В работе дан краткий обзор направлений деятельности Отдела кинетических уравнений Института прикладной математики им. М.В. Келдыша по расчету ядерных реакторов.

Ключевые слова: ядерный реактор, первые программы, ИПМ им.М.В.Келдыша

Vladimir Alekseevich Chuyanov

First calculations of nuclear reactors in Keldysh Institute of Applied Mathematics.

Calculation of nuclear reactors in the Department of kinetic equations of the Keldysh Institute of Applied Mathematics was carried out under the guidance of E.S. Kuznetsov in the years 1953-1966 with the participation of T.A. Germogenova, M.V. Maslennikov, V.A. Chuyanov, L.V. Mayorov, O.B. Moskalyov, I.G. Krutikova, A.V. Voronkov.

This work presents a brief overview of the activities of the Department of kinetic equations of the Keldysh Institute of Applied Mathematics in the calculation of nuclear reactors.

Key words: nuclear reactor, first calculations, Keldysh Institute

Оглавление

Работа отдела под руководством Е.С. Кузнецова.....	5
Работы учеников Е.С. Кузнецова	7
Литература	12

В 1953 году был создан Институт прикладной математики, который тогда назывался Отделение прикладной математики Математического института имени В.А.Стеклова Академии наук СССР.

Директором института был Мстислав Всеволодович Келдыш.

Одновременно с созданием института создавались и отделы. Отдел кинетических уравнений вначале был переведен из Института физических проблем Академии наук СССР, где директором был Петр Леонидович Капица.

Там была лаборатория, занимавшаяся расчетами. Руководил расчетами Лев Давидович Ландау. Расчеты велись на механических машинках – арифмометрах типа Mercedes.

Электрические арифмометры давали возможность за восемь часов работы произвести восемьсот арифметических операций. Обычно это делали два вычислителя в две руки, сверяя результаты, поскольку была очень большая вероятность ошибок.

В вычислительной лаборатории Института физических проблем было около двадцати девушек-вычислительниц. Потом, когда изменилась обстановка и Л.Д.Ландау перестал заниматься военными задачами, эту лабораторию расформировали, часть ее была переведена в наш институт. Какое-то время, около года, это был отдел, которым руководил преемник Л.Д. Ландау – И.М. Халатников, впоследствии академик.

Позднее Мстислав Всеволодович Келдыш вспоминал, что ему очень нравился этот романтический период начала расчетов, когда ничего не получалось, когда расчеты давали какие-то непонятные «пилы». Был даже спор между Л.Д. Ландау и А.Н. Тихоновым: Ландау считал, что нельзя продолжать расчеты, когда в результате получают такие пилы. А Тихонов и его сотрудники как-то сглаживали эти результаты и умудрялись получать данные из таких расчетов. Л.Д. Ландау разработал способы, которые позволяли считать по устойчивым схемам – это были неявные схемы. Обычно первые расчеты велись по явным схемам, так считал Л.В.Канторович в Ленинграде, так же вели первые расчеты у нас здесь в Отделении прикладной математики.

Неявные схемы позволяли устойчиво считать с большим шагом. Делать схему устойчивой за счет мелких шагов – это значило очень сильно увеличивать время расчетов, что совершенно не годилось, когда расчет велся не на электронных вычислительных машинах, а на электро-механических, когда расчеты вели вычислители вручную.

Было даже трехдневное совещание в Институте прикладной математики – тогда Отделении прикладной математики, – на котором решили, что надо считать так, как считали у Л.Д.Ландау в Институте физических проблем, т.е. считать по неявным схемам с большим шагом. Это было зафиксировано

заказчиками-физиками, после этого и у А.Н.Тихонова стали считать тоже по неявным схемам.

Стоит сказать также несколько слов о взаимодействии с физиками: от Института атомной энергии (ЛИПАН – Лаборатория измерительных приборов – название, не имевшее никакого отношения к тому, что делалось в этом институте) – к нам приезжал доктор наук Фейнберг Савелий Моисеевич. Он рассказывал, как они себе представляют расчет ядерного реактора. По аналогии с расчетом кристаллической решетки надо выделять ячейку, рассчитывать отдельную ячейку, усреднять константы, после чего считать ядерный реактор. Такая методика довольно долго сохранялась, пока не стали учитывать, что разные ячейки в реакторе находятся в разных условиях.

В дальнейшем выделилось две задачи: одна задача – расчет ячейки ядерного реактора, вторая задача, после усреднения характеристик – гомогенизации (когда уже рассматривался реактор, состоящий не из отдельных ячеек, а как бы однородный) – расчет самого реактора.

В это время начали сооружаться первые ядерные реакторы. Это было время создания первой атомной электростанции. Первая атомная электростанция была рассчитана по многогрупповой программе на ЭВМ «Стрела» с двадцатью энергетическими группами В.А. Чуяновым и сотрудниками.

Эта программа была составлена по методике Гурия Ивановича Марчука. Т.е. получение многогрупповых уравнений проходило с учетом сильного поглощения.

А уже каждое отдельное многогрупповое уравнение решалось по методике Андрея Николаевича Тихонова, предусматривающей сквозной счет, когда каждая расчетная точка могла быть разрывной (т.е. быть на границе двух различных зон с различными свойствами).

Тогда уже была разработана методика, получившая название «прогонки». Метод «прогонки» можно описать как сведение одного разностного уравнения второго порядка к трем разностным уравнениям первого порядка и перенос граничных условий на одну границу. Если у вас есть граничные условия на двух границах, то можно перенести их на одну границу, после чего считать задачу при заданных начальных условиях на одной границе.

Такая программа на машине «Стрела» была сделана и передана в Обнинск, в математический отдел института, где тогда работал Г.И. Марчук, институт, который теперь носит название Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского.



Евграф Сергеевич Кузнецов

Работа отдела под руководством Е.С. Кузнецова

Одновременно с созданием опытных атомных электростанций создавались промышленные атомные электростанции. Первыми такими станциями были Ленинградская атомная станция и Нововоронежская атомная станция.

Сотрудники Института атомной энергии давали задание нашему отделу по расчету кампании, как ведет себя с течением времени ячейка и реактор для Нововоронежской станции. Эти расчеты проводил Евграф Сергеевич Кузнецов, ему помогала Иоланта Георгиевна Крутикова, расчеты уже велись не только вручную, но и на различных машинах. Кроме нашей машины, мы считали еще на машине «БЭСМ». Машина «БЭСМ», созданная под руководством конструктора С.А.Лебедева, работала в Вычислительном центре Академии наук, который выделился в свое время из нашего института.

Таковы были первые расчеты ядерных реакторов и первые программы.

Расчеты, которые проводил Институт атомной энергии, не были многогрупповыми, они были одногрупповыми, полугрупповыми и двухгрупповыми. То есть в основном из каких-то физических соображений задавались константы, и, главным образом, надо было вести расчет уравнений диффузии нейтронов, а также процессов, которые в реакторе проходят с течением времени.

Известно, что когда пустили первый ядерный реактор, он очень быстро остановился, потому как продукты деления отравляли этот ядерный реактор, вносили большое поглощение и он выходил из зоны критичности и переставал работать.

Это отравление надо было учесть и в Нововоронежских реакторах. Причем это была, как теперь говорят, «жесткая задача», т.е. масштабы по времени у этих процессов были очень разные: процесс отравления очень быстрый, а затем процесс выгорания урана-235, медленный процесс. Таким образом, нужно было задать сразу это отравление и затем считать выгорание. Причем одновременно считались и ячейка, и реактор.

Эти практические расчеты были полезны для тех, кто конструировал эти реакторы. А сейчас и Ленинградский, и Нововоронежский реакторы свой век отслужили, выводятся из эксплуатации, и заменяются на новые реакторы, построенные с учетом современных требований и того опыта, который был наработан за эти годы.

К этому же времени относятся расчеты реакторов в кинетическом приближении, а не в диффузионном. Первые такие программы делались по методу Карлсона. Этот метод применялся с некоторыми модификациями Е.С. Кузнецовым. В частности, он заметил, что появляется неустойчивость в этом методе на границах зон, и избежать этой неустойчивости можно с помощью шага, который должен измельчаться вблизи границ.

По этой методике была составлена программа Майей Мартыновной Антимоник, по которой был рассчитан быстрый ядерный реактор для Дубны.

В дальнейшем такие программы расчета не в диффузионном, а в кинетическом приближении, делались Александром Васильевичем Воронковым по методу, близкому к методу Карлсона. Эти методы можно называть методами квадратур (SN-методы), и, с точностью до граничных условий, эти методы эквивалентны методу сферических гармоник. Методом сферических гармоник считали в разных местах, в частности, в Арзамасе-16 – И.А. Адамская, в Отделении прикладной математики – Сергей Константинович Годунов.

А.В.Воронков сделал несколько программ, как одномерных, так и двумерных. С вводом в действие машины БЭСМ-6 появились новые возможности для расчетов – большая память, большое быстродействие – и стал возможен переход от одномерных по пространству задач к двумерным и даже трехмерным. Трехмерные задачи первым начал рассчитывать А.В.Воронков.

Большую программу для двумерных задач сделали целой группой программистов под руководством Михаила Романовича Шуры-Буры (программисты Т.А.Тросман, И.Х.Зусман, Г.М.Олейник-Овод, В.Н.Торопцева). Эти программы делались по заданию, которое разрабатывала Татьяна Анатольевна Гермогенова, и с их помощью стали рассчитывать геометрически двумерные ядерные реакторы. Много внимания уделялось тому, чтобы даже при довольно большой памяти, которая появилась на машине, уместить большое количество расчетных точек и зон, которые требовались для расчета

реактора. Дело в том, что реактор представляет из себя очень сложную конструкцию, для ее описания нужно вводить много зон с различными свойствами и много расчетных точек. М.Р. Шура-Бура предложил тогда такой способ: считать независимо каждую зону, после чего сопрягать все в один реактор с помощью итераций.

Эта программа использовалась, по ней делалось много расчетов для Института Н.А. Доллежала (НИКИЭТ) и для Физико-энергетического института в Обнинске. Н.А. Доллежал был руководителем, хотя в большей степени этим занимались его сотрудники, поскольку самому Доллежалу было уже сто лет – это был старейший деятель в области ядерной энергетики. Надо сказать, что в эту область приходили, естественно, из других областей – из тех, кто занимался теплофизикой, из тех, кто занимался расчетом паровых котлов, мостов – возникали специалисты в области ядерной энергетики.

Для института Н.А. Доллежала было сделано много расчетов. Один реактор («Топаз») предназначался для посадки на Луну и регулировался с помощью поворотного сектора (когда есть поглощающий элемент на поверхности цилиндра, а при повороте цилиндра мы можем вводить его в активную зону или выводить). И вот для ядерного реактора, который должен был обеспечивать энергетикой лунную станцию, нужно было рассчитать такой управляющий элемент.

В 1961 году удалось сравнить теоретические результаты по методу сферических гармоник с тем, что получила в своих расчетах И.А.Адамская. Оказалось очень хорошее совпадение, т.е. экспериментальная скорость сходимости, которую получила И.А.Адамская, совпала с расчетной, теоретической скоростью, которая была получена В.А. Чуюновым.

Работы учеников Е.С. Кузнецова

Лев Васильевич Майоров занимался программами сначала в диффузионном приближении, а потом, после перехода в Институт атомной энергии, сделал такие же программы по методу Монте-Карло в кинетическом приближении для расчета термализации.

Термализация – очень важная вещь при расчете тепловых ядерных реакторов (реакторов на тепловых нейтронах). В свое время много расчетов Л.В.Майоров делал для расчетов РБМК (реакторы большой мощности, канальные, к этому типу принадлежал реактор Чернобыля). В свое время он заметил, что необходимо проводить очень точные расчеты термализации вблизи энергии плутониевого резонанса. Когда в ядерном реакторе накапливается плутоний, то при расчете термализации надо учитывать плутониевый резонанс в области одного электрон-вольта – очень важная вещь для «реакторов Чернобыльского типа», РБМК.

К сожалению, в свое время была определенная недооценка расчетов на электронных машинах в Институте атомной энергии. До этого момента расчеты

велись инженерами на логарифмических линейках, поэтому было и недоверие к машинным расчетам и соответствующая техника не закупалась, и машинное время не предоставлялось в нужных количествах. Если бы не эта недооценка, возможно, раньше бы оценили эффекты, которые имели место в реакторах Чернобыльского типа.

Скажу еще о работах Олега Борисовича Москалева. Он все время занимался методом Монте-Карло в контакте с теми сотрудниками, которые этим методом занимались у нас в институте под руководством Николая Николаевича Ченцова. Тогда были актуальны задачи прохождения нейтронов через слои железо-водной защиты. Соответствующие расчеты делались совместно с Институтом стали, где проводились измерения прохождения нейтронов через броневые листы, делались рекомендации для защиты военной техники от поражающих факторов ядерного взрыва. Впоследствии удалось считать не только одномерные, но и многомерные защиты, поскольку нужно было рассчитать, какую дозу получает экипаж, скажем, танка, при работе в боевых условиях.

Интересной работой в это время занимался Михаил Валерьянович Масленников. В то время была идея И.В. Курчатова, что при конструировании ядерных реакторов можно как-то использовать анизотропию рассеяния и деления ядер нейтронами. Анизотропия могла бы привести к тому, что, скажем, критическая масса была бы меньше не для сферической формы ядерного реактора, а для вытянутой формы (эллипсоида). Эту идею надо было проверить, чем и занимался М.В. Масленников. Оказалось, что выигрыша не получается даже при учете анизотропии деления и рассеяния. Кроме этого, М.В. Масленников выпустил работу, посвященную нестационарному реактору (как считать различные режимы реактора в зависимости от времени, например, очень быстрые режимы, когда реактор разгоняется или переходит с одной мощности на другую). В этой области М.В. Масленниковым были разработаны численные схемы и проведены расчеты, в которых эти схемы опробовались.

Отметим еще работу по константам, по ядерным данным. Дело в том, что расчет ядерного реактора требует большого количества данных. Эти данные собираются по всему миру, есть несколько мировых центров, где данные оцениваются. Это сечение различных процессов – рассеяния, деления, захвата – в зависимости от энергии. Но естественно, что вводить их в расчет в том виде, как они получаются в эксперименте, нельзя: вначале эти данные должны быть оценены, поскольку они получены в разных условиях, у разных экспериментаторов. Во-вторых, зависимость от энергии очень сложная – сечения имеют миллионы резонансов («пиков») – в расчете же используются усредненные данные (групповые), число групп может быть порядка нескольких десятков. Большое внимание уделялось заготовке подобных констант ядерных данных для различных видов реакторов. Используются разные системы констант для реакторов разного спектра (для тепловых реакторов одна система

констант, для быстрых реакторов другая система констант). Этим занимался Г.И.Марчук, а в нашем институте А.В. Воронков с сотрудниками.

Осталась упомянуть работу, которую вели с помощью двумерной программы в диффузионном приближении, написанной группой программистов под руководством М.Р. Шура-Буры. По этой программе проводились расчеты так называемого профилирования, этим занимался В.А.Чуянов. Профилирование – инженерный термин, означающий проектирование ядерного реактора, удовлетворяющего определенным требованиям. Конструкция реактора получается в виде зависимости концентрации различных элементов от координат. Эти задачи решались с помощью двумерной программы, проводилось профилирование по заданному тепловыделению: скажем, как получить заданное тепловыделение в различных зонах реактора, изменяя концентрацию различных элементов, входящих в ядерный реактор. В основном изменялась концентрация делящихся элементов (уран-235 либо другой делящийся изотоп). Были также проведены расчеты профилирования по температуре, где состав реактора, состав зон, менялся в зависимости от того, какие ограничения накладывались на температуру внутри зоны. Эти расчеты велись уже для реакторов, которые выполнялись в ОКБ-456 у В.П. Глушко для космических двигателей, когда ядерный реактор служит для нагрева рабочего тела, в частности, жидкого водорода, нагреваемого до такой температуры, которую выдерживают материалы реактора. Надо так менять концентрацию делящегося вещества, так чтобы его температура не превысила допустимые значения (скажем, 3000 градусов).

Как-то Мстислав Всеволодович Келдыш позвонил Евграфу Сергеевичу Кузнецову и сказал, что свяжет его с Виталием Михайловичем Иевлевым. В.М.Иевлев был любимым учеником Мстислава Всеволодовича. М.В.Келдыш тогда был у нас директором института и одновременно научным руководителем НИИ-1. НИИ-1 был ракетный институт, созданный еще М.Н.Тухачевским, в нем работали такие замечательные ученые как С.П. Королев, В.П. Глушко, там создавались различные ракетные системы, в том числе легендарная «Катюша». В то время трудно было заниматься ракетной техникой, все время случались какие-либо чрезвычайные происшествия, и у нас, и за рубежом, ракеты очень часто взрывались. А при той мании вредительства, которая была в конце 1930-х годов, очень легко было попасть под репрессии – так были репрессированы создатели легендарной «Катюши». Есть такие сведения, что на предприятии был некий инженер Костиков, писавший во все компетентные органы, что ракеты взрываются не по техническим причинам, а из-за вредительства. Так пострадал С.П. Королев, которого еле спасли из ссылки в Магадан, и В.П. Глушко, который работал потом в так называемой «шарашке» у А.Н.Туполева. Вот что представлял из себя этот институт НИИ-1.

Но М.В.Келдыш работал уже в другое время, НИИ-1 разрабатывал проекты, связанные с оборонными задачами для ракетной техники, в частности, с полетом человека в космос. За год до полета Ю.А.Гагарина М.В.Келдыш распространил в Институте такое сообщение с вопросом, что готовится полет человека, и у кого какие есть на этот счет соображения – нам это показалось чистой научной фантастикой.

И вот М.В.Келдыш звонит Е.С.Кузнецову и связывает его с В.М. Иевлевым, любимым своим учеником. Келдыш выхватывал В.М.Иевлева даже во время отпуска, когда его искали в туристско-альпинистских походах на Кавказе. В то время он занимался, в том числе с другими задачами, применением ядерной энергии в ракетах. И у нас, и за рубежом, существовало много проектов, каким образом можно нагревать рабочее тело (имелся в виду водород, как наиболее подходящий) с помощью ядерной энергии, «ядерной печки», до тех температур, которые возникают в ракетном двигателе при сгорании горючего, – и тогда можно получить в ракете хорошие скорости истечения и хорошие скорости самой ракеты, поскольку скорость ракеты зависит от соотношения массы ракеты и выброшенного рабочего тела и скорости его истечения. Были такие традиционные проекты, в частности, В.П. Глушко занимался такими проектами, когда на вход в ядерный реактор подается водород при очень низкой температуре или даже жидкий, а на выходе получается водород, нагретый до температур, сравнимых с теми, что дает ракетный двигатель на химическом топливе. Но очень быстро было понято, что материалы, которые применяются в реакторе, ограничивают эти температуры и выше 3000 градусов Цельсия нагреть без повреждения самой ракеты рабочее тело не удастся, а это температуры, которые можно достичь и с помощью химии.

Так вот В.М. Иевлев работал над такими двигателями, которые не имеют ограничений, задаваемых материалами, – это плазменные двигатели. Первые обычные двигатели назывались «тип А» и «Б», а плазменные – «тип В», над этим «типом В» он и работал, и этим М.В.Келдыш предложил заниматься Е.С.Кузнецову. Е.С.Кузнецов отнесся к этому делу очень серьезно, и у нас в отделе было несколько человек, которые занимались плазмой с прицелом на эти плазменные двигатели, там же можно будет получать температуры, на порядок более высокие, – не 3000 градусов, а 30 000 градусов, это обеспечивает и большие скорости истечения и возможность полета к планетам, скажем, к Марсу можно будет долетать в несколько раз быстрее, чем на химических двигателях.

У нас плазмой занимался Юрий Сергеевич Сигов, ему в помощь передавались сотрудники, которые должны были связать его с этими ракетными делами. Вся трудность была в том, что испытывать эти двигатели было очень сложно, рабочее тело – это был не только нагретый до высокой температуры водород, но и какие-то элементы самого реактора. Можно было использовать для создания плазмы, например, уран в состоянии плазмы, но

выбрасывать из сопла двигателя такие продукты, радиоактивные и химически опасные, можно было только в космическом пространстве, на Земле их надо было собирать в какие-то газгольдеры и это выливалось в какие-то большие сооружения. Поэтому трудность испытаний, конечно, задержала развитие этой идеи, и так дошло до 90-х годов, когда вообще все новые идеи были остановлены.

Несколько слов о взаимодействии Келдыша, Кузнецова и Курчатова. У И.В.Курчатова была очень красивая идея: сделать ядерный реактор вообще без всяких органов регулирования, сделать просто куб из урано-графитовой смеси, и когда там начнется ядерная реакция и будет подниматься температура, то вследствие температурных эффектов коэффициент размножения упадет, реакция остановится, реактор начнет остывать. Реактор остывает, опять возникает цепная реакция, идет разгон реактора, и поскольку там нет никаких органов регулирования и материалов, кроме графита с ураном, можно получить очень большие температуры и очень большие потоки нейтронов, которые потом можно использовать для испытания материалов. Когда мы получили задание, такой реактор назывался «ДОУД-3», нам казалось очень странным это сочетание букв и цифр. Позже, после смерти Курчатова, из книжки И.Н. Головина «И.В. Курчатов» мы узнали, что это сокращение означает «до третьего удара», т.е. реактор должен быть создан и испытан, пока жив И.В.Курчатов, пока у него нет третьего инсульта.

Реактор получился очень хороший, и под названием «РВД» (реактор взрывного действия) о нем был доклад на 3-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Настолько он был удачный, что был 2-й его вариант «РВД-2», позже он использовался для того, чтобы получать большие потоки нейтронов в петле. Петля должна была представлять из себя ячейку или часть газового реактора типа «В», плазменного реактора, т.е. часть ракетного двигателя. Такие испытания проводились в свое время в Казахстане В.М. Иевлевым. Сам реактор получил хорошую оценку, а наш институт получил благодарность за участие в работах над этим реактором. От Института атомной энергии в работе над этим реактором принимал участие В.В. Шевелев.

Литература

1. И.М. Халатников, Воспоминания о Л.Д. Ландау, Наука, 1988.
2. И.Н. Головин, «И. В. Курчатов», М.: Атомиздат, 1979.
3. Л.В. Майоров, В.Ф. Турчин, Универсальная программа расчета сечений рассеяния медленных нейтронов (УПРАС) // Препринт МИ АН СССР, № 149. 1963.
4. Л.В. Майоров, В.Ф. Турчин, Влияние химической связи на термализацию нейтронов // Труды III Женевской конф., New York, UN. 1965.
5. Г.И. Марчук, Н.Н. Пономарев-Степной, В.А. Чуянов, Оптимизация характеристик ядерных реакторов // Труды III Женевской конф., New York, UN. 1965.
6. В.А. Чуянов, Расчет первой атомной электростанции на ЭВМ «Стрела» // Атомная энергия, 1957.