

# Лаборатория информационных технологий

(Лаборатория вычислительной техники и автоматизации)

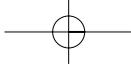
## 1. Введение

В июне 1966 года по решению XX сессии Ученого совета ОИЯИ была создана Лаборатория вычислительной техники и автоматизации (ЛВТА) на базе Вычислительного центра Института, а также отделов и групп автоматизации и обработки экспериментальных данных Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории высоких энергий.

К этому времени техника эксперимента в ядерной физике достигла такого уровня, что она позволяла получать первичные экспериментальные данные с высокой скоростью и в больших объемах, с которыми классические методы обработки, с помощью карандаша и бумаги, уже не в состоянии были справиться. На помощь физикам в решении этой проблемы пришла только что родившаяся электронно-вычислительная техника, которая очень скоро заняла прочное место в научных исследованиях. Однако техническое и программное оснащение первых электронно-вычислительных машин (ЭВМ) были мало приспособлены не только для применения в эксперименте, но и для теоретических работ. Поэтому во многих научных подразделениях ОИЯИ появились технические и программные разработки, направленные на применение ЭВМ в научных исследованиях. Цель создания новой лаборатории в ОИЯИ состояла в концентрации под единым руководством



Здание Лаборатории информационных технологий ОИЯИ



этих ресурсов. Так, кстати, поступали во многих других крупных физических центрах мира.

Основные направления научной деятельности ЛВТА были нацелены прежде всего на обеспечение проводимых в ОИЯИ теоретических и экспериментальных исследований средствами ЭВМ. В приказе дирекции о создании лаборатории особое внимание уделялось проблемам автоматизации экспериментальных исследований в области физики элементарных частиц и атомного ядра.

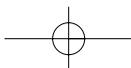
В исследованиях по физике высоких энергий того времени большую роль играло изучение взаимодействий ускоренных частиц с веществом при помощи пузырьковых и других оптических трековых камер. Первичные экспериментальные данные в этих методиках получались в виде стереофотографий событий взаимодействия частиц в объеме камеры. Автоматизация кропотливого процесса обработки стереофотографий, с целью извлечения содержащейся в них физической информации, потребовала довольно крупных инженерно-технических разработок и поэтому ей было отведено особое внимание при создании лаборатории.

Наряду с этим, в лаборатории должны были быть развиты методы прикладных вычислений и численного моделирования ядерных процессов, а также математические методы расчетов электромагнитных полей в проектируемых и создаваемых крупных физических установках.

В приказе по ОИЯИ от 19 августа 1966 г. № 149 конкретные задачи лаборатории сформулированы следующим образом:

- всестороннее развитие вычислительной техники и вопросов программирования в Институте как основы автоматизации обработки экспериментальной информации и математических расчетов для теоретических и экспериментальных исследований;
- обеспечение всего комплекса обработки экспериментальной информации на вычислительных машинах и, прежде всего, обработки фотографий с пузырьковых и искровых камер, получаемых в ОИЯИ и на ускорителе в Серпухове;
- обеспечение связи и координации совместных работ стран-участниц ОИЯИ по вопросам вычислительной техники, программированию, развитию методик обработки и другим вопросам автоматизации;
- координация основных работ по созданию и развитию измерительных центров в лабораториях ОИЯИ и внедрению цифровых вычислительных машин в экспериментальные методики.

Организация новой лаборатории была поручена авторитетному ученому и опытному организатору Михаилу Григорьевичу Мещерякову, известному физико-экспериментатору, который в конце 40-х годов в Дубне руководил созданием синхроциклотрона и первой научной лаборатории – нынешней Лаборатории ядерных проблем. Его незаурядная, эрудированная и требовательная личность, его глубокое понимание роли методики и экспериментальной техники в физическом эксперименте, как необходимые средства для получения новых научных результатов, на долгие годы определили дух и стиль работы лаборатории как научного подразделения ОИЯИ. Вместе с ним в новую лабораторию перешла его научно-экспериментальная группа, физическим исследованиям которой посвящен отдельный раздел в данном историческом очерке.





Дирекция Лаборатории вычислительной техники и автоматизации (1985 г.)  
Слева направо: Н.Н.Говорун, С.А.Щелев, М.Г.Мещеряков

До конца своей жизни он оставался почетным директором лаборатории и принимал активное участие в научной жизни ОИЯИ. Сегодня бюст М.Г.Мещерякова работы армянского скульптора Мамикона Амалковича Сагателяна украшает фойе здания лаборатории.

Заместителями директора по научной работе вновь созданной лаборатории стали Георгий Иванович Забиякин и Николай Николаевич Говорун.

Для координации работ в ОИЯИ в области автоматизации и вычислительной техники был создан постоянно действующий Координационный совет из представителей лабораторий под председательством одного из вице-директоров Института.

В соответствии с поставленными задачами работы в лаборатории велись в следующих научных и научно-технических отделах:

- базовых вычислительных машин;
- измерительных центров лабораторий;
- автоматизации;
- математической обработки экспериментальных данных;
- вычислительной математики;
- обработки фильмовой информации.

Кроме этого, для функционирования лаборатории был создан отдел производственно-технического обслуживания.

Эта структура в целом сохранилась до конца 80-х годов, когда основные работы по автоматизации процессов обработки фотоснимков были завершены, созданные установки были переданы на эксплуатацию в Отдел обработки фильмовой информации, и Отдел автоматизации был закрыт.

По инициативе М.Г.Мещерякова и под его руководством при лаборатории был создан Совет по защите кандидатских и докторских диссертаций. Этим подчеркивается его стремление вести работы в новой лаборатории на высоком научном уровне.

В Совете за эти годы успешно были защищены сотни кандидатских и докторских диссертаций как сотрудниками ОИЯИ, так и учеными из других институтов стран-участниц ОИЯИ. Многим ведущим ученым ЛВТА по ходатайству этого Совета присвоено звание профессора.

В 1988 году М.Г.Мещеряков передал руководство лабораторией в руки Николая Николаевича Говоруна. Н.Н.Говорун со дня основания ЛВТА был заместителем директора и очень скоро стал главным идеологом ОИЯИ по применению и развитию ЭВМ в научных исследованиях. Физик по образованию, Н.Н.Говорун после защиты кандидатской диссертации на кафедре математики физфака МГУ в 1961 году был направлен на работу в ОИЯИ. К моменту создания ЛВТА он накопил большой опыт работы в области применения ЭВМ в научных исследованиях и пользовался большим авторитетом среди коллег-физиков. В 1989 году Н.Н.Говорун скоропостижно скончался в расцвете творческих научных сил, всего лишь один год исполняя обязанности директора лаборатории. Но его основополагающие идеи о развитии и применении вычислительной техники в ОИЯИ еще на долгие годы определили стиль лаборатории в этом направлении.

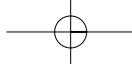
У истоков ЛВТА также стоял известный математик Евгений Петрович Жидков, который перешел в ЛВТА из ЛТФ вместе с руководимым им вычислительным центром. Известная сегодня далеко за пределами Института математическая школа ОИЯИ является его детищем. После смерти М.Г.Мещерякова (1994 г.) Е.П.Жидков был назначен председателем Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций.

С 1990 по 2000 год директором ЛВТА избирался Рудольф Гейнцевич Позе, физик из ГДР (теперь – ФРГ), который хорошо известен по своей работе с 1969 по 1971 год в качестве заместителя директора ЛВТА, а также по многолетнему сотрудничеству в области автоматизации между ЛВТА и ИФВЭ АН ГДР.

В 90-е годы весь ОИЯИ переживал тяжелый переходный период. В новых геополитических условиях нужно было по-новому определить место Института в мировом научном сообществе. Это, конечно, коснулось и ЛВТА. Но к специфическим пробле-



Дирекция ЛВТА (1995 г.). Слева направо: В.В.Кореньков, Р.Позе, И.В.Пузынин



мам ОИЯИ добавились проблемы, которые были связаны с всеобщим переходом развитых стран мира в единое информационное общество. Это означало: отказ от морально устаревших больших универсальных ЭВМ с огромным штатом обслуживающего их персонала; отказ от идеологии создания единого вычислительного центра Института в пользу распределенных вычислений; участие в крупных международных научных проектах; подключение к бурно развивающимся компьютерным сетям для науки и высшей школы; применение международных стандартов. Кроме этого, свертывались работы по автоматизации обработки камерных фотоснимков, так как эта методика была заменена электронными методами детектирования частиц. Эти обстоятельства привели к коренному пересмотру научно-технической программы лаборатории, повлекшему за собой реорганизацию структуры и существенное сокращение ее штатной численности. Внешне эти изменения отразились в переименовании ЛВТА в Лабораторию информационных технологий (ЛИТ).

Первым директором ЛИТ Ученым советом ОИЯИ с 2000 по 2003 год был избран Игорь Викторович Пузынин, математик, многолетний заместитель директора, начальник отдела вычислительной физики ЛВТА, известный своими научными работами, в том числе по мю-катализу.

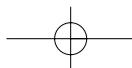
В 2003 году директором ЛИТ избран заместитель директора Виктор Владимирович Иванов – признанный специалист в области разработки и применения новых математических методов в решении физических задач.

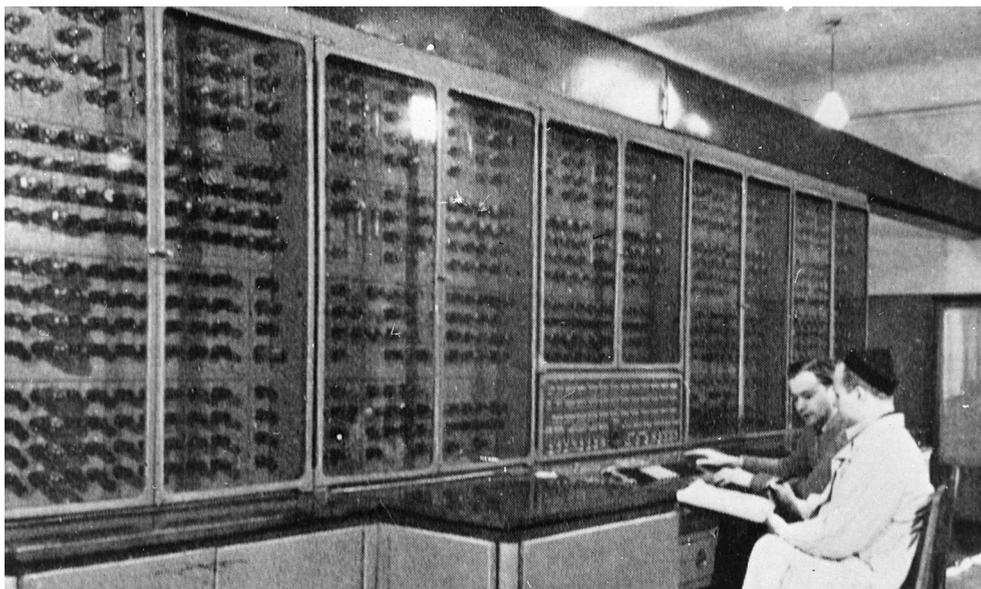
Очерки по истории развития Лаборатории вычислительной техники и автоматизации вошли в ранее изданные буклеты ОИЯИ. Они, как правило, охватывают более короткие эпизоды жизни или отдельные научные направления. Поэтому в данном очерке, посвященном истории развития лаборатории на протяжении 40 лет, неизбежно встречаются некоторые повторения ранее написанного.

С самого начала работы в ЛВТА велись в напряженной атмосфере. Требования ученых ОИЯИ к предоставляемым им ресурсам вычислительной техники и средствам автоматизации росли не в ногу с темпами промышленного развития этой техники. Сокращение финансовых средств Института накладывало дополнительные ограничения. Поэтому многое из того, что сегодня серийно выпускается промышленностью, на начальном этапе развития приходилось разрабатывать и производить собственными силами. Все эти работы лаборатории описываются в исторической последовательности в пунктах 2–6. Работы сотрудников ЛВТА, непосредственно вписывающиеся в физическую программу исследований ОИЯИ, представлены в пунктах 7 и 8 в виде научных статей.

## **2. Центральный вычислительный комплекс ОИЯИ**

Первая электронно-вычислительная машина Урал-1 (производительностью 100 операций в секунду и памятью на магнитном барабане) появилась в ОИЯИ еще до создания ЛВТА в 1958 году. На ней сотрудники Вычислительного центра ОИЯИ получили первый опыт по созданию программного обеспечения для научных расчетов, по анализу фильмовой информации с 24-литровой пропановой пузырьковой камеры, облученной на пучках синхрофазотрона ОИЯИ.

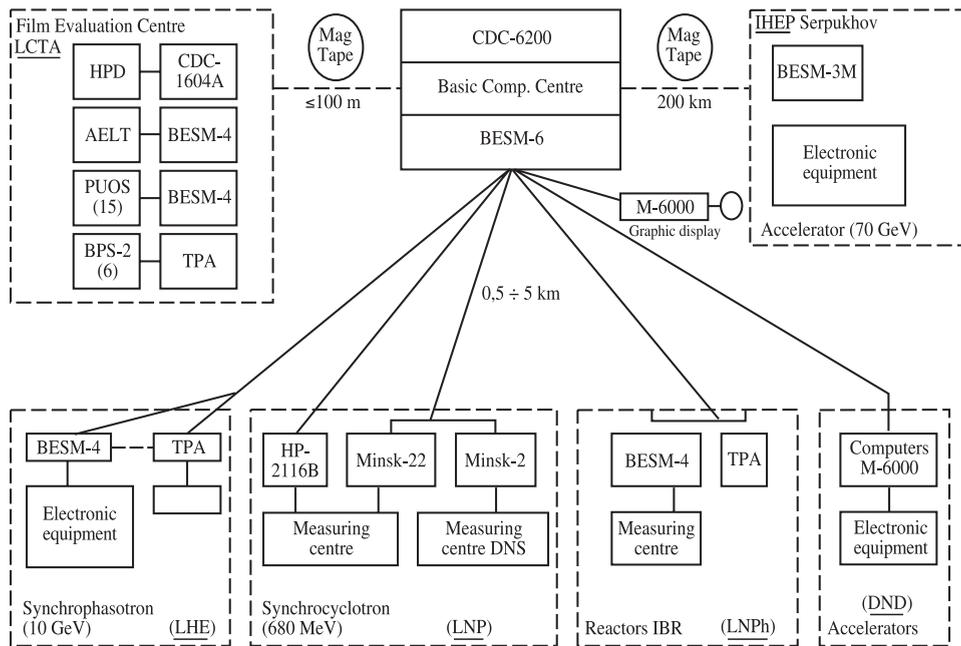




За пультом управления первой ЭВМ ОИЯИ – УРАЛ-1 В.В.Сиротин, В.В.Федорин (1958 г.)

Очень скоро опыт по применению вычислительной техники выявил потребность в самом разнообразном использовании вычислительных машин, что предопределило, в конечном счете, создание в ОИЯИ высокопроизводительного многомашинного комплекса с развитой иерархической структурой. Создание такого комплекса стало реальным по мере появления все более надежных, мощных, универсальных и специализированных ЭВМ. Работа коллектива сотрудников ЛВТА впоследствии обеспечила создание такого вычислительного комплекса ОИЯИ, который развивался по мере поступления и освоения новых ЭВМ. К началу 80-х годов основу и самый верхний уровень Центрального вычислительного комплекса (ЦВК) ОИЯИ составили электронно-вычислительные машины БЭСМ-6, CDC-6500, ЕС-1060 и ЕС-1061. Эти базовые машины предназначались для выполнения сложных расчетов и решения математических задач, а также для обработки большого объема экспериментальной информации, получаемой на ускорителях и импульсном реакторе ОИЯИ. Средний уровень был представлен ЭВМ типа БЭСМ-4, CDC-1604, Минск-22, Минск-32. Машины этого уровня предназначались, прежде всего, для решения специфических задач отдельных лабораторий. Некоторые из этих машин имели непосредственную связь с ЦВК ОИЯИ.

Самый нижний уровень был представлен малыми вычислительными машинами М-6000, Электроника-100, ТРА-і, ЕС-1010 и др. Эти машины нашли широкое применение в системах контроля и управления работой физических установок, сканирующих устройств, а также в устройствах, повышающих эффективность доступа к машинам верхнего уровня (удаленные станции ввода-вывода, дисплейные станции и др.), (рис. 1).

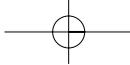


**Рис. 1.** Схема центрального вычислительного комплекса ОИЯИ в начале 70-х годов

В середине шестидесятых годов, когда были введены в эксплуатацию вычислительные машины нового, мощного по тем временам уровня (класса М-20, Минск-2), а затем и БЭСМ-6, стало реальным применение на них больших программ для пол-



За ЭВМ Минск-22 В.М.Кадыков, Э.В.Лейбман (1967 г.)



ной обработки данных, поступающих от экспериментальных установок. В зарубежных ядерно-физических центрах, с которыми физики ОИЯИ поддерживали тесные научные контакты, к тому времени уже создавались библиотеки таких программ, написанных для мощных ЭВМ на машиннонезависимом языке ФОРТРАН. Поэтому и в ОИЯИ встал вопрос о переходе к программированию на ФОРТРАНЕ. Этот вопрос начал решаться в 1966–1967 годах, когда впервые были написаны строки транслятора на ЭВМ БЭСМ-6. Эти работы, в конечном счете, привели к созданию мониторной системы «Дубна», включившей в себя языки Алгол, Мадлен, Лисп, Паскаль и др. Ее неотъемлемой частью стала обширная библиотека программ общего назначения, представлявшая собой набор стандартных средств для решения задач современными методами вычислительной математики и математической физики. Мониторная система «Дубна», разработанная в ЛВТА с привлечением специалистов из стран-участниц ОИЯИ, была передана практически во все организации, применяющие ЭВМ типа БЭСМ-6. Этот эпизод в жизни лаборатории является, пожалуй, наиболее ярким примером выполнения третьего пункта в списке задач, перечисленных в вышеуказанном приказе о создании ЛВТА<sup>1</sup>.

Специфика задач ОИЯИ и работа машины в составе вычислительного комплекса потребовали также существенной переработки операционной системы БЭСМ-6, которая тогда же была реализована в ЛВТА. Окончательная версия новой операционной системы (ОС) позволяла в режиме разделения времени решать до 16 пользовательских и 8 служебных задач. Это потребовало разработки и реализации нового универсального алгоритма разделения времени между задачами и каналами обмена с внешней памятью и алгоритма обслуживания виртуальной памяти ЭВМ.

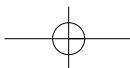
В 1972 году подобное программное обеспечение было создано и для БЭСМ-4, ставшей основной машиной средней мощности в ОИЯИ и, таким образом, проблема перехода на ФОРТРАН в ОИЯИ была решена. Только спустя 20 лет, в середине девяностых годов, произошел всеобщий переход на следующий уровень программирования – на так называемые объектно-ориентированные языки С, С<sup>++</sup> и др.

С момента ввода в эксплуатацию БЭСМ-6 стала главным компьютером Института. Это выдвинуло целый ряд требований к обеспечению ее надежности и эффективной эксплуатации. Работы по дооснащению и модернизации БЭСМ-6, сооружению внешних каналов связи между машинами и измерительными центрами лабораторий ОИЯИ с использованием венгерских малых ЭВМ типа ТРА, оснащению вычислительных машин Института стандартными магнитофонами, изготовленными в НРБ, и другие работы, описанные выше, проводились в тесном сотрудничестве между инженерами и программистами лаборатории. В результате всех этих работ повысилась эффективность и существенно улучшилось использование вычислительного комплекса ОИЯИ.

В семидесятые годы одной из базовых ЭВМ для пользователей ОИЯИ стала CDC-6200, которая впоследствии была развита до уровня CDC-6500. Она в меньшей степени потребовала доработок ее штатного программного обеспечения. Но тем не менее

---

<sup>1</sup> Бродцински Э., Говорун Н.Н., Веретёнов В.Ю., Гизе Петер, Гизе Пирошка, Гирр Р., Заикин Н.С., Загинайко В.А., Леч Д., Ловаш Э., Силин И.Н., Хошенко А.А., Шириков В.П. Транслятор с языка ФОРТРАН для системы математического обеспечения БЭСМ-6 // Первая Всесоюзная конференция по программированию, серия В. Киев, 1968.



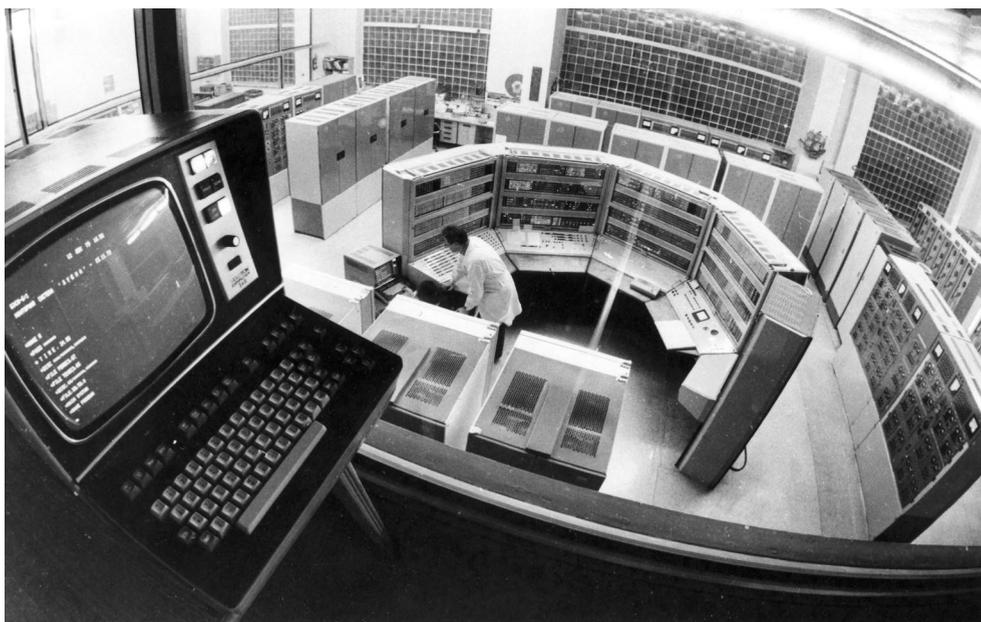


Обсуждение вопросов, связанных с развитием Мониторной системы «Дубна» (1969 г.)  
Слева направо: И.Н.Силин, В.П.Шириков, В.Ю.Веретенев, В.А.Ростовцев, Н.Н.Говорун

потребовалось оптимизировать операционную систему машины, улучшить средства отладки программ на языках высокого уровня, обеспечить совместимость с другими ЭВМ по библиотекам программ общего назначения, в основу которых были положены многие программы, разработанные ранее в ОИЯИ, а также в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) и в ряде других институтов. С этой ЭВМ также началось внедрение сначала в ОИЯИ, а затем и в других организациях стран-участниц ОИЯИ программных систем для проведения аналитических выкладок на ЭВМ<sup>1</sup>. Более 22 лет физики ОИЯИ совместно с участниками международных коллабораций использовали ЭВМ CDC для своих расчетов. Инженерно-техническими работами на CDC руководил А.П.Кретов, а работы по системному анализу и программированию возглавлял И.И.Шелонцев, а с 1988 г. — Л.А.Калмыкова.

При переходе на ЭВМ серии ЕС, в разработке и серийном выпуске которых принимали участие ряд стран СЭВ, решались вопросы выбора для них базового варианта операционной системы и создание библиотеки программ, которая по своей структуре и набору возможностей была бы аналогична библиотекам, созданным для БЭСМ-6 и CDC-6500. Адаптация модулей этих библиотек на ЕС ЭВМ должна была учитывать, в частности, необходимость сохранения той же точности расчетов, что и на БЭСМ-6 и CDC-6500. Работами по созданию библиотек программ руководила Р.Н.Федорова.

<sup>1</sup> Гердт В.П., Говорун Н.Н., Федорова Р.Н., Шириков В.П. Математическое обеспечение аналитических вычислений на ЭВМ // Современные проблемы прикладной математики и математической физики. Сб. науч. тр. М.: Наука, 1988. С. 150–160.



ЭВМ БЭСМ-6

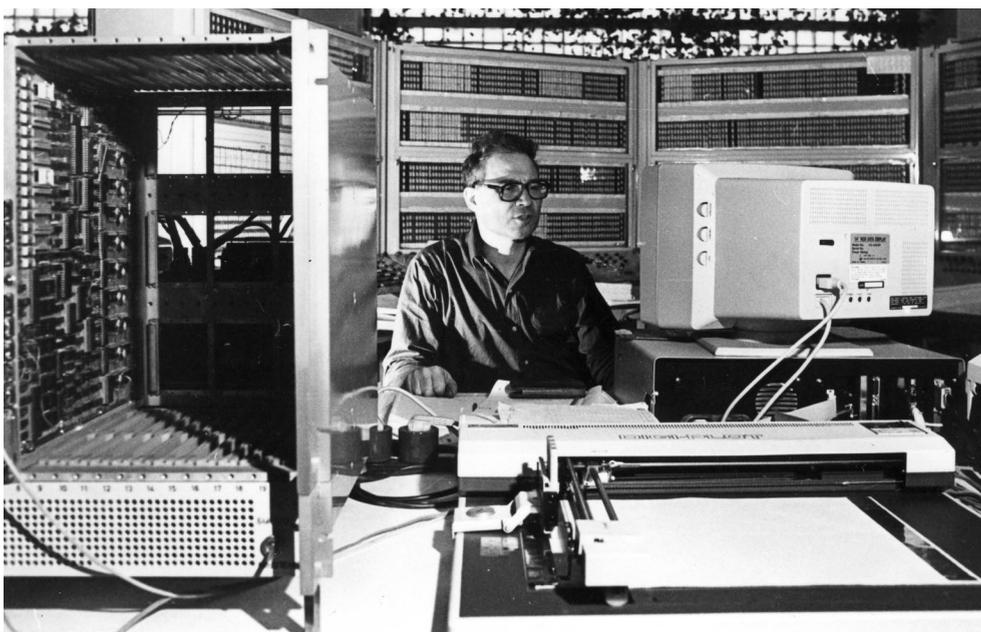
В ЛВТА были выполнены также разработки эффективных программ для обслуживания терминалов, которые подключались к ЭВМ серии ЕС. Комплекс таких программ под названием ТЕРМ был передан во многие организации стран-участниц ОИЯИ. Основным разработчиком этого комплекса программ был В.В.Кореньков.

Создание и развитие вычислительного комплекса Института, измерительных центров в лабораториях, станций ввода-вывода, равно как и создание центра обработки камерных снимков в ЛВТА, потребовали выполнения ряда крупных инженерных работ по развитию и модернизации самих вычислительных машин<sup>1</sup>. Сюда относятся: разработка быстродействующих каналов для обмена информацией, создание специальной аппаратуры передачи данных по кабельным линиям связи на большие расстояния, разработка новых устройств для подключения к вычислительным машинам физических установок, работы по расширению оперативной памяти и оснащению вычислительных машин дополнительными внешними устройствами.

Удобное и эффективное использование базовых ЭВМ было бы крайне затруднено без обеспечения пользователей разных подразделений Института средствами развитого терминального доступа.

До 1979 года существовал независимый доступ с терминалов к БЭСМ-6 и CDC-6500 и средствам связи БЭСМ-6 с периферийными машинами измерительных центров. Затем был сделан первый шаг к объединению терминалов двух машин (БЭСМ-6

<sup>1</sup> *Говорун Н.Н., Карлов А.А., Мещеряков М.Г., Поляков В.Н., Чулков Н.И., Шириков В.П., Щелев С.А.* Вычислительный комплекс Объединенного института ядерных исследований и перспективы его развития // Автоматика и вычислительная техника. 1974. № 6. С. 62–68.



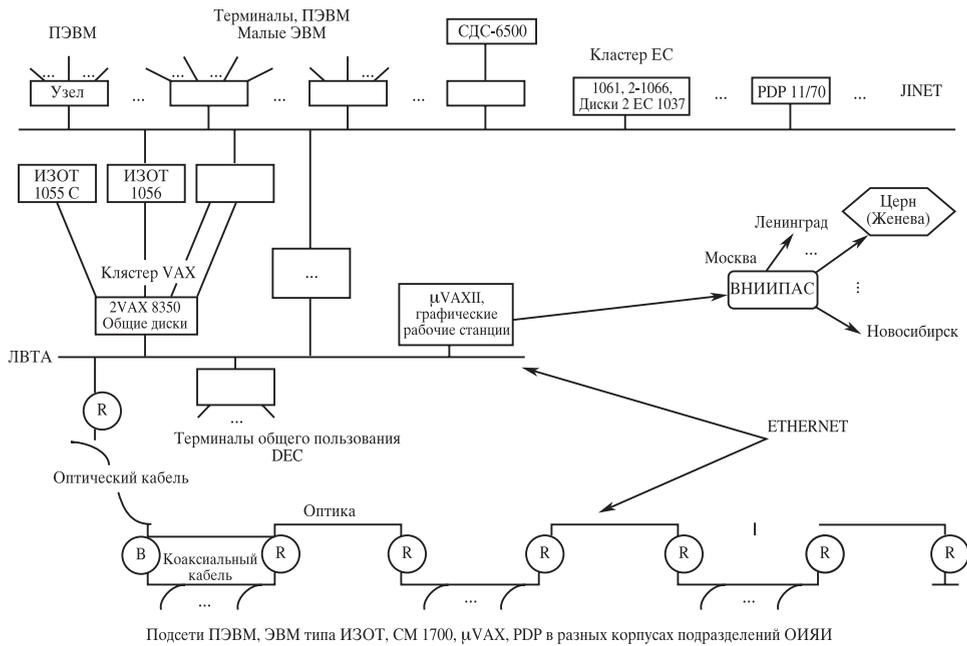
И.А.Емелин за монитором МКБ-8601, интегральной ЭВМ ряда БЭСМ-6, разработанной ЛВТА

и CDC-6500) через концентратор на базе малой ЭВМ ЕС-1010, для которой специально была подготовлена соответствующая операционная система. В качестве терминальных устройств стали выступать как простые дисплеи, так и персональные ЭВМ. Концентратор также обеспечил доступ и к ЕС-1060.

В конце 80-х годов группой сотрудников ЛВТА под руководством Игоря Николаевича Силина была выполнена большая работа по проектированию и созданию макета БЭСМ-6 в настольном варианте, пользуясь современными средствами микроэлектроники<sup>1</sup>. Но к этому времени мировой рынок уже был завоеван персональными компьютерами IBM, и эта оригинальная разработка не была доведена до практического использования.

Примерно с 1983 года в ОИЯИ отошли от традиционного пути создания вычислительных комплексов и началось построение более общих, сетевых структур с общей для ЭВМ и терминалов скоростной средой передачи данных. В 1985 году по этому принципу была создана первая общепитетутская терминальная сеть JINET (Joint Institute Network). Программное обеспечение JINET было полностью разработано в отделе развития и эксплуатации математического обеспечения ЭВМ ЛВТА под руководством В.П.Ширикова. Приобретенные в 1986 году в большом количестве для сотрудников Института персональные компьютеры Правец-2, программно совмести-

<sup>1</sup> Емелин И.А., Кадыков В.М., Левчановский Ф.В., Попов М.Ю., Сапожников А.П., Сапожникова Т.Ф., Силин И.Н. Архитектурные особенности МКБ-8601, интегральной ЭВМ ряда БЭСМ-6. ОИЯИ Р11-91-43. Дубна, 1991.



**Рис. 2.** Схема центрального вычислительного комплекса ОИЯИ и JINET в 80-х годах

мые с IBM PC/XT, были также включены в JINET (рис. 2). В 1987 году ОИЯИ стал абонентом международной компьютерной сети<sup>1</sup>.

Продолжая политику обеспечения программной совместимости, по меньшей мере на уровне прикладного программного обеспечения в интересах международного сотрудничества, в 1989 году в ЛВТА в эксплуатацию вводится кластер машин типа VAX-8350, которые в это время стали широко применяться партнерами ОИЯИ по международному сотрудничеству. В том же году ЛВТА удалось приобрести техническое оборудование для создания первой очереди сети ETHERNET. Позднее JINET и ETHERNET были объединены в одну сеть (рис. 3).

С лета 1993 года до июня 2002 года основной базовой ЭВМ для физиков ОИЯИ стала ЭВМ CONVEX, имеющая UNIX-подобную операционную систему CONVEX-OS и выполняющая четыре основных функции для пользователей ОИЯИ: коммуникационную (почтовый сервис, передача файлов, использование программных средств для работы на компьютерах других вычислительных центров), информационную (веб-сайт ОИЯИ был запущен на ЭВМ CONVEX в 1994 году), архивную (предоставление доступа к обширному архиву программных продуктов для различных операционных систем) и вычислительную (обеспечение эффективного решения за-

<sup>1</sup> Аниховский В.Е., Говорун Н.Н., Галактионов В.В., Дорохин А.Т., Емелин И.А., Заикин Н.С., Каданцев С.Г., Кретов А.П., Лопырев Д.Н., Мазепа Е.Ю., Перушов В.И., Фарисеев В.Я., Шириков В.П., Щелев С.А. Локальная сеть Объединенного института ядерных исследований. Техническое и программное обеспечение // Тринадцатая школа «Программирование-88». Варна, 1988.

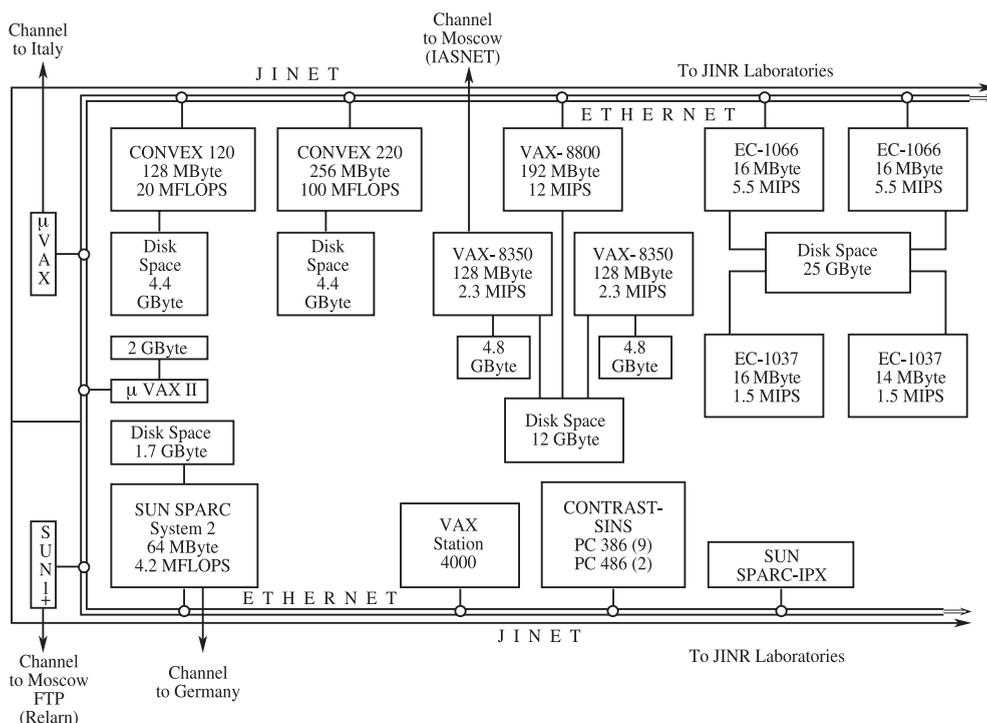
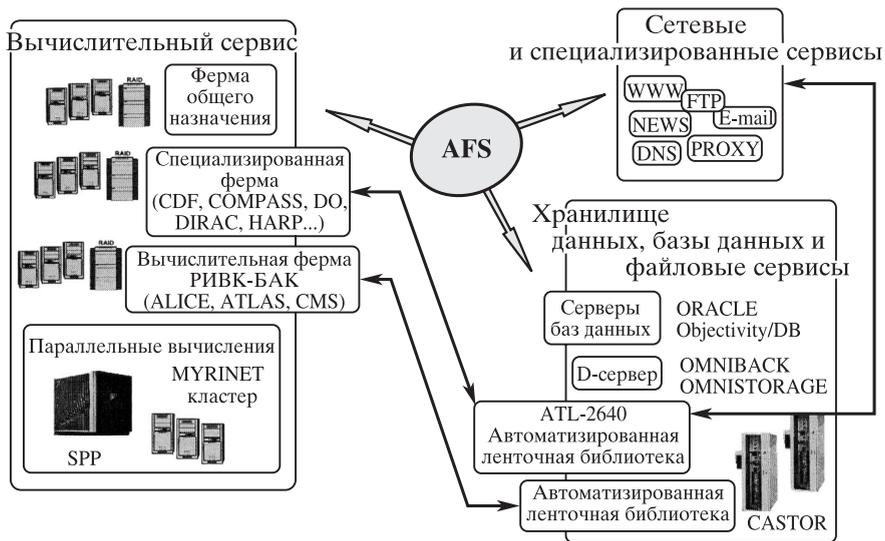


Рис. 3. Схема центрального вычислительного комплекса ОИЯИ в 90-х годах

дач, допускающих векторизацию и распараллеливание). За инженерное обслуживание ЭВМ CONVEX отвечали Л.А.Попов и А.В.Гусев, системное администрирование осуществляли В.В.Мицын и Е.А.Тихоненко.

С начала 90-х годов появились новые возможности приобретения вычислительной техники для ОИЯИ. Одним из первых шагов в этом направлении было расширение сети ETHERNET на все лаборатории Института и переход от последовательной архитектуры к более перспективной — звездообразной. Так создавалась локальная сеть ОИЯИ. Затем последовали различные варианты использования спутниковых, а также наземных линий связи для вхождения в европейскую и американскую глобальные компьютерные сети для науки и образования<sup>1</sup>. Опыт этих работ скоро привел к определенной политике Института, суть которой состоит в выработке совместной политики с ведущими российскими организациями, такими как RBNET (Российская опорная компьютерная сеть для науки и высшего образования) и RUNET (компьютерная сеть российских университетов).

<sup>1</sup> Dolbilov A., Dorokhin A., Fariseev V., Kadantsev S., Mazepa E., Mitsyn V., Pose R., Sissakian A., Shestakov B., Shirikov V., Shirkov D., Shchinov B., Tkachev L., Zaikin N., Dobromyslov S. Networking for JINR and JINR Member States: Status and Trends // 4th Joint European Networking Conference. Trondheim, Norway, May 10–13. 1993. P. 214–220.



**Рис. 4.** Сервисы Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ

При дальнейшем развитии ЦВК ОИЯИ, теперь уже под названием Центрального информационно-вычислительного комплекса (ЦИВК) ОИЯИ, учитывается прогресс в развитии так называемых GRID-технологий и построения компьютерной инфраструктуры нового типа, обеспечивающей глобальную (всемирную) интеграцию информационных и вычислительных ресурсов<sup>1</sup>. При этом для организации надежного хранения и оперативного доступа к разнообразной информации используются технологии корпоративных хранилищ данных. На смену кластерам рабочих станций на RISC-процессорах и многопроцессорным серверам приходят серверы, вычислительные кластеры и фермы на базе процессоров Pentium. Основой программного обеспечения ЦИВК ОИЯИ становится операционная система LINUX (рис. 4). Главным системным администратором и идеологом этой платформы в ЛИТ ОИЯИ является В.В.Мицын.

В настоящее время информационные методы все шире внедряются в научную деятельность. В ЛИТ ведутся работы по развитию и сопровождению базовых WWW серверов ОИЯИ и ЛИТ, по оптимизации научно-информационного поиска, обеспечению прозрачного доступа к разнообразным информационным ресурсам ОИЯИ и к мировым электронным библиотечно-информационным ресурсам, в том числе физических научных центров, университетов России и других стран-участниц ОИЯИ, научно-технических библиотек<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Кореньков В.В., Тихоненко Е.А. // Концепция GRID и компьютерные технологии в эру ЛНС/ РЕРАН. V. 1/ 332. P. 6.

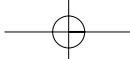
<sup>2</sup> Борисовский В.Ф., Калмыкова Л.А., Кекелидзе М.Г., Кореньков В.В., Никонов Э.Г., Стриж Т.А., Филозова И.А. Электронные информационные ресурсы ОИЯИ: концепция и технологические решения. ОИЯИ Р11-2002-229. Дубна, 2002.



Зал машин серии ЕС  
в ЛВТА



И.В.Пузынин с сотрудниками в  
терминальном зале ЦВК ОИЯИ



Развитие вычислительной техники в ЛВТА/ЛИТ ОИЯИ в сжатой форме представлено в таблице 1.

**Таблица 1. Развитие вычислительной техники в ЛВТА/ЛИТ ОИЯИ**

1958 г.	Первая ЭВМ в ОИЯИ. Введена в эксплуатацию вычислительная машина «Урал-1» производительностью 100 операций/с и памятью на магнитном барабане
1961 г.	Ввод в эксплуатацию ЭВМ М-20 (20 тыс. операций/с) и «Киев» (5 тыс. операций/с)
1962 г.	Первый шаг на пути построения многомашинного комплекса для обработки экспериментальной информации в физике элементарных частиц – перфорированная киноплёнка с измерительных полуавтоматов поступает на «Киев» и обрабатывается. Спектрометрическая информация из измерительного центра ЛНФ по кабелю длиной около 1 км передается для обработки на центральные ЭВМ
1965 г.	Создана двухмашинная система сбора и обработки информации на базе «Минск-2» и М-20
1967 г.	Введена в эксплуатацию вычислительная машина БЭСМ-4
1968 г.	Появление БЭСМ-6 в ОИЯИ. Создание транслятора с языка ФОРТРАН, мониторной системы «Дубна», распространившихся на всех машинах БЭСМ-6 в СССР и за рубежом (в ГДР, Индии), создание операционной системы «Дубна» на БЭСМ-6 Оснащение вычислительного центра машинами М-6000, Минск-2, БЭСМ-4, ТРА, CDC-1604А
1972 г.	ЦВК пополнился ЭВМ CDC-6200 (в дальнейшем модернизированной до двухпроцессорной CDC-6500, оснащенной в 1976 г. удаленными терминалами) Производительность комплекса выросла до 3 млн. операций/с CDC-6500 выведена из эксплуатации в 1995 г.
1976 г.	Ввод в режим массовых измерений фильмовой информации сканирующего автомата HPD на линии с CDC-1604
1978 г.	На АЭЛТ-2/160 приступили к массовой обработке информации
1979 г.	Создание системы терминального доступа к БЭСМ-6 и CDC на базе языка «Интерком». Техническая основа связи реализуется на малой ЭВМ ЕС-1010, создание многомашинного комплекса ОИЯИ на базе БЭСМ-6 и каналов быстрой связи с ИВЦ лабораторий
1980 г.	Начало массовых измерений снимков спектрометра РИСК сканирующей системой «Спиральный измеритель» на линии с PDP-8
1981 г.	Внедрение ЭВМ единой серии – ЕС-1060, ЕС-1061 Подключение терминальных устройств ко всем базовым ЭВМ ОИЯИ (Интерком и подсистема ТЕРМ)
1985 г.	Сдана в эксплуатацию общеинститутская терминальная сеть JINET (Joint Institute Network), программное обеспечение которой полностью разработано в ЛВТА
1986 г.	Массовое приобретение персональных ЭВМ «Правец-2», программно-совместимых с IBM PC/XT; включение ПЭВМ в сеть JINET ОИЯИ
1987 г.	Сеть JINET ОИЯИ стала абонентом международной компьютерной сети
1989 г.	Ввод в эксплуатацию кластера машин VAX-8350 и первой очереди сети ETHERNET; сопряжение сетей JINET и ETHERNET Ввод в эксплуатацию ЭВМ ЕС-1037, ЕС-1066, организация многомашинного комплекса ЕС ЭВМ на базе общей дисковой памяти

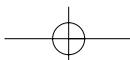
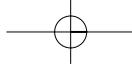


Таблица 1 (окончание)

1991 г.	Первые серверы и рабочие станции семейства SUN в ОИЯИ; развитие кластеров рабочих станций
1992 г.	Суперминикомпьютеры семейства CONVEX (C-120, C-220)
1993–1994 гг.	Организация наземного и двух спутниковых каналов связи по протоколу TCP/IP локальной сети ОИЯИ с глобальными сетями, внедрение первых WWW серверов. К сети подключено 1200 компьютеров
1996 г.	Модернизация наземного цифрового канала связи ОИЯИ–Москва до пропускной способности 128 Кбит/с Создание модемного пула ОИЯИ Замена центральных устройств ЕС-1066 на двухпроцессорную IBM4381 Ввод в эксплуатацию базового сервера DEC ALPHA 2100 для межинститутского информационного центра ОИЯИ по проекту БАФИЗ с открытым сетевым доступом по WWW
1997 г.	Создание узла связи в рамках российской базовой сети RBNET, реализация скоростного оптического канала связи ОИЯИ–Москва с пропускной способностью 2 Мбит/с Запуск многопроцессорной векторной системы С3840 Создание специализированного распределенного SUN-кластера для эксперимента CMS в ОИЯИ.
1998 г.	Внедрение технологии АТМ в рамках локальной компьютерной сети ОИЯИ Создание центра высокопроизводительных вычислений ОИЯИ на базе массивно-параллельной системы HP Exemplar SPP-2000, векторно-параллельной вычислительной системы С3840 и системы массовой памяти ATL2640 на DLT лентах емкостью 10,56 Тбайт Создание экспериментальной вычислительной PC-фермы для экспериментов CMS и ALICE
1999 г.	Завершено создание опорной сети ОИЯИ на базе АТМ-технологии
2000 г.	Создание PC-фермы общего доступа в составе центра высокопроизводительных вычислений ОИЯИ Ввод в строй 32-процессорной системы АРЕ-100 для расчетов на решетках Общее число пользователей компьютерной сети ОИЯИ составило 3105
2001 г.	Расширение канала компьютерной связи ОИЯИ до 30 Мбит/с. Переход на технологию Fast Ethernet (100 Мбит/с) в опорной сети ОИЯИ Создание тестового Грид-сегмента в ОИЯИ Расширение PC-фермы до производительности ~ 2000 SPECint95 (производительность в 1 SPECint95 приблизительно соответствует 40 млн. операций в секунду)
2002 г.	Создание в составе центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ (ЦИВК ОИЯИ) нового распределенного комплекса из 4-х взаимосвязанных компонент: интерактивного кластера общего доступа; вычислительной фермы общего назначения; вычислительной фермы для экспериментов на ЛНС; вычислительного кластера для параллельных вычислений. В состав ЦИВК входят 80 процессоров с общей производительностью 80 Gflops, веб-сервера, сервера баз данных и файловые сервера с дисковыми RAID-массивами. Суммарная емкость дисковых массивов составляет 6 Тбайт
2003 г.	Расширение канала компьютерной связи ОИЯИ до 45 Мбит/с Переход на технологию Gigabit Ethernet (1000 Мбит/с) в опорной сети ОИЯИ Общее число пользователей компьютерной сети ОИЯИ составило более 4500
2005 г.	Расширение канала компьютерной связи ОИЯИ–Москва до 1000 Мбит/с Общее число пользователей компьютерной сети ОИЯИ составило 5200 Емкость дисковых массивов ЦИВК ОИЯИ увеличена до 50 Тбайт Создание Грид-лаборатории



### 3. Автоматизация обработки камерных снимков

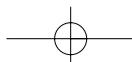
Как было отмечено выше, в исследованиях по физике высоких энергий в шестидесятые-семидесятые годы большую роль сыграло изучение взаимодействий ускоренных частиц с веществом с помощью пузырьковых и других оптических трековых камер. События взаимодействия частиц в объеме камеры фотографируются несколькими фотоаппаратами, и затем траектории участвующих во взаимодействиях частиц восстанавливаются по полученным стереофотографиям. Этот процесс принято называть обработкой фотографий. Он требует очень точных измерений координат нескольких точек на траекториях частиц на фотопленках (в пределах 2–5 мкм) и затем сложных математических расчетов для восстановления пространственной картины события. Для исследования закономерностей физических процессов, происходящих при таких столкновениях частиц, требуется анализировать десятки и сотни тысяч фотографий. Естественно было подумать об автоматизации таких сложных и многократно повторяющихся процессов обработки. Работы в этом направлении начались в ЛВЭ и ЛЯП еще в самом начале становления ОИЯИ и целесообразность объединения усилий в этом направлении, на базе вычислительной техники, послужили обоснованием для создания ЛВТА.

Работы по автоматизации обработки камерных снимков в ЛВТА велись одновременно по нескольким направлениям, главным образом в Отделе автоматизации под руководством Юрия Александровича Каржавина<sup>1</sup>. Основным рабочим инструментом за все время работы в этой области в Институте служили полуавтоматические устройства ПУОС на основе «большого инструментального микроскопа», разработанные еще в ЛВЭ<sup>2</sup>. Процесс измерения, то есть наведение измерительного стола на измеряемые точки траекторий, в этих устройствах оператор вел вручную, координаты точек при этом измерялись автоматически, и полученные данные выводились на перфорированную ленту. Ленты с данными поступали на одну из вычислительных машин для проведения с помощью специализированных программ геометрической реконструкции, кинематического анализа, физического анализа. Позже эти полуавтоматические приборы были подключены сначала к управляющим вычислительным машинам среднего уровня, а позже и к персональным компьютерам. Теперь данные измерения прямо передавались в управляющие ЭВМ, которые в реальном масштабе времени проводили проверку поступающих данных измерений на формальную исправность. Полуавтоматы типа ПУОС были переданы в ряд институтов стран-участниц ОИЯИ для обработки фотоснимков с пузырьковых камер ОИЯИ в больших коллаборациях.

Для обработки фотографий, полученных на трековых камерах ОИЯИ, а впоследствии и на камерах некоторых других институтов, был создан Отдел обработки

<sup>1</sup> *Govorun N.N., Inkin V.D., Karzhavin Ju.A., Meshcheriakov M.G., Moroz V.I., Pose R., Shigaev V.N., Shkunderkov V.N.* Development of Track Chamber Picture Processing Systems at JINR // Proc. of the Int. Conf. on Data Handling Systems in High-Energy Physics. Cavendish Laboratory. Cambridge, 1970. CERN 70-21. Geneva, 1970. P. 753–759.

<sup>2</sup> *Виноградов А.Ф., Говорун Н.Н., Елисеев Г.Н., Иванченко З.М., Кретов А.П., Мороз В.И., Проценко Н.А., Самойлов В.Н., Степанов В.Д., Чернышова Г.Н., Чулков Н.И.* Система для измерения камерных снимков на базе полуавтоматических измерительных приборов, работающих на линии с ЭВМ БЭСМ-4. ОИЯИ 10-8783. Дубна, 1975.



фильмовой информации в ЛВТА под руководством Владимира Ивановича Мороза. В отделе велись работы по созданию, адаптации и модернизации программ для обработки информации, в частности, для материала с тяжеложидкостных пузырьковых камер ЛВЭ. Научные сотрудники отдела участвовали в физическом анализе обрабатываемых данных.

К сожалению, ряд оригинальных разработок, выполненных еще в ЛВЭ и ЛЯП и направленных на повышение уровня автоматизации процесса измерений, впоследствии не получили своего применения из-за недостаточно стабильной работы используемых в них только что появившихся полупроводниковых приборов.

Одно из направлений работ ЛВТА по автоматизации процесса измерения камерных снимков было связано с созданием автомата НРД, сканирующего фотоснимок «бегущим лучом». Тонкий световой луч, бегая по фотоснимку, просвечивает его, а расположенный за фотоснимком фоточувствительный элемент при этом вырабатывает электрические сигналы, несущие информацию о координатах точек пересечения световым лучом траекторий частиц. Оптико-механическая часть такого устройства была приобретена у зарубежной фирмы, а электронная часть изготовлена в отделе автоматизации ЛВТА. Это сканирующее устройство управлялось вычислительной машиной ТРА. Массивы данных сканирования по каналу связи передавались на ЭВМ CDC-1604 для фильтрации и обсчета по программе геометрической реконструкции. Для проведения автоматического сканирования на этом автомате, помимо просмотра пленок и отбора событий, подлежащих обработке, необходим был предварительный промер снимков, задающий автомату общую картину каждого обрабатываемого события (так называемая «маска» события). Заготовка масок выполнялась на шести специальных, разработанных в Отделе автоматизации, просмотрово-измерительных столах (БПС), работавших на линии с малой ЭВМ<sup>1</sup>. В создании сложных программ для фильтрации данных сканирования этого автомата принимали участие сотрудники Отдела математической обработки экспериментальных данных, которым руководил Н.Н.Говорун. Производительность сканирующего устройства НРД составляла около 200 тыс. событий в год.

Устройство с бегущим лучом (НРД) является довольно универсальным прибором, на котором, в принципе, можно обрабатывать фотографии с изображениями совершенно разных объектов. Ряд работ в этом направлении был проведен в ЛВТА по инициативе Н.Н.Говоруна.

По другому пути пошли разработчики прибора со спиральной разверткой — «Спиральный измеритель». В этом приборе использовалась особенность ядерных взаимодействий, состоящая в том, что для большинства изучаемых взаимодействий события имеют вид нескольких следов частиц, выходящих из одной точки, — так называемая вершина события. Если вершину такого события совместить с центром спиральной развертки и затем осуществить сканирование снимка по спирали увеличивающегося радиуса, то за время выполнения спиральной развертки можно зарегистрировать все

<sup>1</sup> Алмазов В.Я., Беляков В.Н., Ермолаев В.В., Зайцев В.И., Калмыкова Л.П., Каржавин Ю.А., Мещеряков М.Г., Ососков Г.А., Павлова В.В., Погодина Г.Ф., Позе Р., Рубцов Ю.Ф., Семенов В.Н., Скрьель И.И., Устинов В.И. Большие просмотрово-измерительные столы на линии с ЭВМ ТРА // Труды Междунар. симп. по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер. Д10-6142. Дубна, 1971. С. 213–226.



**Р.Позе, М.Г.Мещеряков, В.М.Котов, А.Е.Селиванов, В.А.Буров  
за просмотром пленок для спирального измерителя (1975 г.)**

треки, выходящие из данной вершины. Скорость измерения, таким образом, не зависит от числа треков, выходящих из вершины. Кроме того, применяя для сканирования не точечную, а продольную щель, ориентированную на вершину события, можно существенно сократить количество помех и информацию о следах, не принадлежащих к данному событию. Фактически производится предварительная фильтрация сигналов со снимка. Для такого прибора также требуется предварительный отбор событий и измерение координат вершин событий, подлежащих измерению. Производительность составляла примерно 10 тыс. событий в год<sup>1</sup>.

Разработка и создание Спирального измерителя является хорошим примером специфики работы ОИЯИ как международной организации и партнера международ-

<sup>1</sup> Котов В.М., Буланова Г.Н., Васильев В.Г., Ваттенбах К., Зайцев В.И., Живаев В.М., Каржавин Ю.А., Косарева З.М., Кулюкина Л.А., Кутуев Р.Х., Кушудун А.И., Лысяков В.Н., Маркозащивили Л.М., Ососков Г.А., О Хи Ен, Позе Р., Понятовский М., Селиванов А.Е., Скрыль И.И., Устинов В.И., Шуман Г. Спиральный измеритель. Общее описание и результаты определения точностных характеристик. Препринт ОИЯИ 10-7939. Дубна, 1974; Материалы VII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований. Л., 1974. С. 444–449.

ных коллабораций. Первый измерительный прибор по принципу спиральной развертки был разработан в Беркли, в Лаборатории им. Лоуренса, в группе Л.Альвареса. Директор ЛВТА М.Г.Мещеряков, во время посещения этого института, обратил внимание на это устройство и Альварес подарил ему чертеж перископа, то есть оптико-механической части, осуществляющей спиральную развертку. В ОИЯИ был создан коллектив конструкторов из лабораторий стран-участниц ОИЯИ, который на основе этого рисунка заново сконструировал прибор. Одним из участников этой работы был ИФВЭ АН ГДР, и в Берлине было найдено ОКБ точной механики, которое вместе с заводом в Карл-Маркс-Штадте (Хемниц) взялось за изготовление этой довольно сложной высокоточной конструкции. Соответственно, все конструкторские чертежи были переведены в стандарты ГДР, для чего был приглашен конструктор из Центра научного приборостроения АН ГДР. Электронная часть прибора была разработана и изготовлена в ЛВТА также коллективом инженеров из стран-участниц. В качестве управляющей ЭВМ использовалась малая машина типа Электроника-100. Программное обеспечение Спирального измерителя было разработано в ЛВТА с участием математиков. Была изготовлена серия из 10 приборов типа Спиральный измеритель для ряда институтов стран-участниц ОИЯИ.

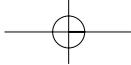
Третье направление разработок ЛВТА по автоматизации процесса обработки камерных снимков, руководителем которого был В.Н.Шкунденков, использовало электронно-лучевую трубку для формирования бегущего по снимку светового луча. В принципе такое устройство является наиболее универсальным прибором для сканирования снимков с различной информацией, так как положение и передвижение светового луча по снимку полностью управляется вычислительной машиной. В некоторых случаях с помощью такого прибора кроме координат точек на снимке можно снимать и информацию о степени почернения в данной точке. Автоматы, работающие по такому принципу (АЭЛТ-1 и АЭЛТ-2), в ОИЯИ использовались для обработки фотографий, получаемых с искровых камер.

Хотя описанные выше автоматы в основном работали в автоматическом режиме, участие человека в случае обработки сложных событий не исключалось. Кроме этого, всегда существуют некоторые события, которые по тем или иным причинам не поддаются полностью автоматизированной обработке. В таких случаях приходилось пользоваться полуавтоматическими установками ПУОС в качестве так называемых станций спасения.

В девяностых годах оптические трековые камеры постепенно были вытеснены электронными методами регистрации взаимодействий частиц, и обработка фильмовой информации в ОИЯИ и все связанные с ней научно-технические разработки были постепенно приостановлены. Отдел обработки фильмовой информации ЛВТА был закрыт.

Нужно отметить, что все эти разработки велись в тесном и плодотворном сотрудничестве со многими институтами стран-участниц и неучастниц ОИЯИ, в частности, с сотрудниками отдела обработки данных (DD-division) ЦЕРНа.

В связи с тем, что в большинстве камерных экспериментов, проводимых в ОИЯИ, участвовали сотрудники институтов стран-участниц и других стран, потребовалось создание современных для того времени программ для математической обработки результатов обмера камерных фотографий, которые могли быть легко адаптированы



для различных ЭВМ, имевшихся в распоряжении участников соответствующих со-трудничеств<sup>1</sup>.

Обработка фильмовой информации, как правило, проводилась в следующей по-следовательности:

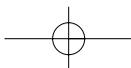
- Просмотр пленок и отбор стереоснимков с событиями исследуемого типа.
- Измерение отобранных при просмотре стереоснимков на одном из вышеописан-ных измерительных устройств.
- Восстановление пространственной картины событий и вычисление параметров частиц; кинематическая идентификация событий, в результате которой выявляет-ся одна или несколько наиболее вероятных гипотез о каждом рассмотренном со-бытии; формирование магнитных лент суммарных результатов и статистический анализ экспериментальных данных, накапливаемых на лентах суммарных резуль-татов (ЛСР).

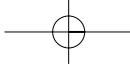
В соответствии с решаемыми в процессе обработки фильмовой информации задаче-ми математическое обеспечение камерных экспериментов состояло из следующих частей:

- Комплекс программ для управления работой просмотрово-измерительных уст-ройств, сбора и накопления данных, получаемых в ходе просмотра, обмера или сканирования снимков, калибровки приборов и фильтрации данных. Эти про-граммы являлись элементами соответствующих измерительных систем и их на-значение, в основном, определялось характером последних.
- Система программ, предназначенных для анализа результатов обмера камерных фотографий. К ним относились программы геометрической реконструкции и ки-нематического анализа событий, программы для формирования ЛСР и статисти-ческого анализа экспериментальных данных. Эта часть математического обеспе-чения является общей для различных систем обработки, поскольку большинство составляющих ее программ практически не зависит ни от характера измеритель-ной системы, ни от конкретных особенностей камер. Исключение составляли лишь геометрические программы, конкретная организация которых зависела как от типа камер, так и от характеристик измерительной системы.
- Программы, предназначенные для решения различного рода вспомогательных за-дач, процесса анализа результатов обмера камерных фотографий. К ним относи-лись программы для вычисления параметров оптических систем камер, составле-ния и обновления каталогов обрабатываемых событий, моделирования экспериментов, генерации событий и т.п.
- Набор сервисных программ, предназначенных для редактирования и сборки тек-стов программ системы, организации и хранения библиотек и т.п.

---

<sup>1</sup> *Абдурахимов А.У., Бадалян С.Г., Бано М., Буздавина Н.А., Врба В., Говорун Н.Н., Гоман В.С., Дирнер А., Иванов В.Г., Илеусузова Р.Б., Кауфманн Х., Клабун Ю., Лепилова Л.И., Локтионов А.А., Новицкий В., Позе Р., Потребеников Ю.К., Реймер П., Ролофф Х.Е., Семан М., Стриж Т.А., Фогт Х., Фрибель В., Футо Э., Херинек И., Шандор Л., Шиллер Х.* Система программ для математической обработки фильмовой информации на мощных ЭВМ. Препринт ОИЯИ Р10-80-657. Дубна, 1980.





Таким образом, математическое обеспечение камерных экспериментов должно было состоять из большого набора взаимосвязанных программных модулей, предназначенных для работы на различных ЭВМ, из которых можно было легко собирать требующиеся в каждом конкретном случае программы.

Развитие программ обработки फिल्मовой информации в значительной степени определялось возможностями имевшихся вычислительных машин. В первое время, например, когда быстродействие ЭВМ было низким, программы писались, как правило, на машинном коде для каждого конкретного эксперимента. Хотя это и позволило в максимальной степени использовать возможности имевшихся в то время ЭВМ, но затрудняло развитие программ и их адаптацию для новых камер или экспериментов.

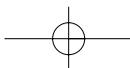
Появление более мощных ЭВМ и трансляторов с языков программирования высокого уровня, в первую очередь ФОРТРАНа, позволило перейти к разработке универсальных программ. Так появилась разработанная в ЦЕРНе цепочка программ THRESH-GRIND-AUTOGR-SLICE-SUMX, предназначенная для анализа данных с жидководородных пузырьковых камер. Первый вариант этой системы силами сотрудников ОИЯИ и ИФВЭ АН ГДР был адаптирован на ЭВМ CDC-1604A и в течение ряда лет использовался для обчета данных с метровой водородной пузырьковой камеры ОИЯИ (ВПК 100). Затем на ЭВМ БЭСМ-6 в ОИЯИ и ИФВЭ АН ГДР были поставлены новые версии этих программ, которые позволяли учитывать неоднородность магнитного поля, потери энергии заряженных частиц, находить изображения одних и тех же треков события на его стереоснимках.

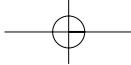
Следующий этап развития математического обеспечения камерных экспериментов был связан с внедрением в практику программирования модульных принципов организации программ с динамически распределяемой памятью. Первым шагом на пути решения этой задачи явилось создание в ЦЕРНе геометрической программы для больших пузырьковых камер (LBCG), которая затем была развита в систему «Гидра». Система «Гидра» затем была внедрена на ЭВМ ОИЯИ и стран-участниц ОИЯИ CDC-6500, БЭСМ-6, ЕС-1040, ИБМ-370/135 и постепенно заменила устаревшие программы обработки फिल्मовой информации.

#### **4. Математическое обеспечение систем анализа ядерно-спектрометрической информации**

Среди проблемно-ориентированных программ важное место в работах сотрудников ЛВТА занимало создание системы обработки спектрометрической информации, создание которой стало возможным с появлением мощных ЭВМ. Первой такой системой в ОИЯИ стала ПОФИ1, созданная на базе ЭВМ Минск-2 в конце шестидесятых годов.

В дальнейшем это направление работ продолжалось в тесном сотрудничестве с ЛНФ и рядом институтов стран-участниц ОИЯИ. Появились системы ПОФИ2 на БЭСМ-4 и СПРОС на машине Минск-2, а с появлением в ОИЯИ машины БЭСМ-6 открылась возможность создания более мощных систем обработки спектрометрической информации. Такой системой стала СОС (система обработки спектров), создан-





ная в 1975–1980 годы сотрудниками ЛВТА под руководством Л.С. Нефедьевой. Спектры ядерных излучений поступают в ЭВМ в виде массивов чисел. Таких массивов в одном эксперименте может быть несколько сотен. Таким образом возникает проблема хранения и обработки больших объемов информации, которая в системе СОС решается путем создания аппарата работы с файлами – массивами информации, состоящими из отдельных записей и хранящимися в памяти ЭВМ<sup>1</sup>.

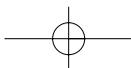
## **5. Использование ЭВМ на линии с экспериментальными установками**

Современные крупные физические эксперименты на больших ускорителях были бы невозможны без использования ЭВМ для управления и мониторинга всей аппаратуры, сбора данных и различных функций предварительной, в реальном времени, обработки и фильтрации данных.

Развитие методов применения ЭВМ на линии с физическими установками в ОИЯИ началось с появлением первой пригодной для этих задач машины. Активное участие в становлении этих методов в ОИЯИ, наряду с сотрудниками физических лабораторий, приняли сотрудники ЛВТА. Первые работы в этом направлении были связаны с экспериментами по  $\pi^- p$ -рассеянию на синхрофазотроне ОИЯИ, в которых использовались магнестрикционные камеры на линии с ЭВМ БЭСМ-3М. В процессе создания этой системы получен первый опыт по решению проблем, касающихся процессов сбора информации, оперативного контроля экспериментального оборудования, хода эксперимента в реальном масштабе времени и автоматического распознавания графических образов событий. Все это послужило основой для дальнейшего бурного внедрения методов компьютеризации экспериментов, проводимых на ускорителях в ОИЯИ и других физических центрах. Опыт создания этой первой системы затем был использован при разработке следующей, включающей ЭВМ БЭСМ-4 на линии с установкой СКИФ, работавшей на синхрофазотроне ОИЯИ.

Следующий важный этап развития работ в этой области связан с проведением, начиная с 1968 года, первых экспериментов в ИФВЭ (Серпухов) на ускорителе У-70. Сотрудники ЛВТА внесли существенный вклад в разработку алгоритмов и программного обеспечения бесфильмового спектрометра с искровыми камерами (установка БИС – бесфильмовый многотрековый искровой спектрометр) для экспериментов по генерации нейтральных каонов. По сравнению с экспериментами на синхрофазотроне ОИЯИ здесь резко возросли требования из-за многократного увеличения масштабов установки, большого объема информации, получаемой за каждый цикл срабатывания спектрометра, усложнения топологии и удвоения внутренней множественности полезных событий, а также из-за повышения уровня фоновых грузов.

<sup>1</sup> Бутцева Г.Л., Воробьева Н.Н., Говорун Н.Н., Завьялова А.С., Злоказов В.Б., Нефедьева Л.С., Расторгуев А.А., Рерих Т.С., Салтыков А.И., Стойков В.Н., Тарасова В.Н., Ягафарова В.Н. Проблемно-ориентированная библиотека программ обработки спектрометрической информации. ОИЯИ Р10-85-171. Дубна, 1985.



Новый этап работы в этой области связан с созданием математического обеспечения для установки «Фотон», в которой устройство управления, сбора и обработки информации развивались в стандартной системе ядерной электроники КАМАК на базе все более усовершенствованных ЭВМ. Использование средств стандартной электроники и вычислительных машин (третье поколение ЭВМ), обладающих развитыми периферийными устройствами, открыло новые возможности для создания многопараметрических экспериментальных установок, предназначенных для изучения широкого класса физических явлений.

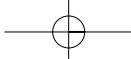
Так, со второй половины 70-х годов в крупномасштабных экспериментах ОИЯИ в качестве базовой управляющей ЭВМ стала использоваться ЭВМ ЕС-1040. Наличие каналов связи в сочетании с относительно высокой вычислительной мощностью способствовали широкому применению таких машин в системах управления экспериментом. Первая система реального времени на базе ЕС-1040 была разработана для экспериментов по поиску очарованных частиц на ускорителе У-70. Комплекс программ для этого конкретного эксперимента включал в себя специально разработанное базовое математическое обеспечение, как относительно самостоятельный программный продукт, ориентированный на широкий класс физических задач. Благодаря такому подходу в сжатые сроки затем было создано математическое обеспечение экспериментов на установке «Кристалл», проведенных в сотрудничестве с рядом других институтов.

Проведение совместного ОИЯИ–ЦЕРН мюонного эксперимента в 80-х годах позволило объединить усилия специалистов двух крупных институтов для разработки математического обеспечения электронных экспериментов. В этом сотрудничестве были созданы проблемно-ориентированные пакеты программ, применяемые практически во всех физических центрах мира. Примерами таких программных пакетов, созданных сотрудниками ЛВТА в соавторстве со специалистами ЦЕРН, является НВООК – пакет программ для статистической обработки результатов эксперимента и для динамической настройки программ и организации диалогового режима.

Электронные вычислительные машины также использовались уже в первых экспериментальных исследованиях в ОИЯИ в области ядерной физики для обработки спектрометрических данных. Последующее развитие экспериментальной методики привело к созданию систем обработки ядерно-спектрометрической информации, в которых ЭВМ накапливала данные, поступающие в нее из экспериментальных установок по кабелям.

В шестидесятых годах успешно применялась система приема, накопления и обработки данных в реальном масштабе времени, созданная совместно сотрудниками ЛВТА и ЛНФ на базе измерительного центра ЛНФ и вычислительных машин Минск-2 и М-20, установленных в ЛВТА. С 1969 года эксплуатировалась и развивалась аналогичная система, выполненная на основе ЭВМ БЭСМ-4 и измерительного центра ЛНФ. Дальнейшее развитие этой системы заключалось в объединении измерительно-вычислительных центров ЛНФ, ЛЯР и ЛЯП с измерительно-вычислительным комплексом ЛВТА в единую трехуровневую систему.

На первом, нижнем, уровне расположены измерительные модули, в состав которых входят измерительное оборудование и малая ЭВМ с проблемно-ориентированным математическим обеспечением. На втором – находится ЭВМ более высокого



класса с развитым математическим обеспечением для хранения, сортировки и предварительной обработки экспериментальных данных. На третьем уровне расположены машины высокого класса вычислительного комплекса ЛВТА, оснащенные обширной библиотекой программ обработки спектров.

Такая иерархическая трехуровневая архитектура под названием «стандартная архитектура» и в настоящее время широко используется при построении систем управления крупными физическими экспериментами и ускорителями. Однако современные системы отличаются от своих предшественников широким применением современных стандартных средств информационных технологий: модульных систем электроники, компьютерных сетей, стандартных шин и т.д.

## 6. Развитие методов математической физики

Вычислительная физика как научное направление оформилась в ОИЯИ к началу девяностых годов. Основную задачу этого направления в настоящее время можно сформулировать как алгоритмическую и программную поддержку теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в Институте на основе эффективного использования современных вычислительных систем и высокоскоростных сетей.

Ранее работы по математическому обеспечению физических исследований велись в лаборатории в двух практически независимых направлениях.

Первое – вычислительная математика, возглавляемое профессором Е.П.Жидковым, включало разработку и развитие методов численного решения задач математической физики, возникающих в физических приложениях, и их программную реализацию, а также выполнение больших расчетов. Сюда же относилась разработка методов и комплексов программ статистического моделирования физических процессов. О развитии этого направления было написано в статьях профессоров В.С.Барашенкова, Е.П.Жидкова, В.Г.Маханькова, Е.Христова в юбилейных изданиях «Объединенный институт ядерных исследований (1956–1986)»; «Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике»; «ОИЯИ 40»<sup>1–4</sup>.

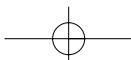
Второе направление – математическая обработка экспериментальных данных, которым руководил член-корреспондент АН СССР Н.Н.Говорун, обеспечивало практически все эксперименты, проводимые в Институте, путем разработки и сопровождения больших систем моделирования и обработки экспериментальной информации.

<sup>1</sup> Барашенков В.С. Математическое моделирование ядерно-физических процессов, инициируемых частицами высоких энергий // Объединенный институт ядерных исследований (1956–1986) / Под общей ред. акад. Н.Н.Боголюбова. Дубна, 1986. С. 253–262.

<sup>2</sup> Жидков Е.П. Непрерывный аналог метода Ньютона в нелинейных задачах математической физики // Объединенный институт ядерных исследований (1956–1986) / Под общей ред. акад. Н.Н.Боголюбова. Дубна, 1986. С. 270–274.

<sup>3</sup> Жидков Е.П., Маханьков В.Г., Христов Е. Нелинейные задачи математической физики // Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике / Под ред. Н.Н.Боголюбова. М.: Энергоиздат, 1986. С. 108–112.

<sup>4</sup> Жидков Е.П. Математическое моделирование – физикам // ОИЯИ 40. Хроника, воспоминания, размышления / Под ред. В.Г.Кадышевского, А.Н.Сисакяна, В.М.Жабицкого. Дубна, 1996. С. 114–118.





Семинар в отделе вычислительной математики под руководством Е.П.Жидкова (1993 г.)

Исторически в рамках этого направления возникла и развивалась компьютерная алгебра, включающая сопровождение ряда пакетов, а также разработку прикладных алгоритмов.

О развитии систем обработки фильмовой информации можно прочесть в статье Н.Н.Говоруна и др.<sup>1</sup>.

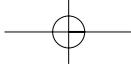
В рамках направления «Вычислительная математика» был получен ряд значительных результатов, относящихся как к разработке численных методов и программного обеспечения, так и к их приложениям к важным задачам физики. Отметим лишь некоторые из них.

В шестидесятые годы был разработан метод минимизации квадратичных функционалов и пакет FUMILI, получивший широкое распространение и вошедший в системы обработки экспериментальных данных. В 2003 году профессор И.Н.Силин решил более сложную задачу минимизации с нелинейными ограничениями на параметры.

Под руководством профессора В.С.Барашенкова в течение ряда десятилетий развивался программный комплекс КАСКАД для моделирования методом статистических испытаний прохождения частиц и ядер в широком спектре энергий через среды сложного состава.

Широкую известность получили работы группы, возглавляемой профессором Е.П.Жидковым, по созданию методов численного решения задач магнитостатики и их приложений к расчетам магнитных полей для конкретных физических установок.

<sup>1</sup> Говорун Н.Н., Иванов В.Г., Позе Р. Системы математической обработки фильмовой информации в физике высоких энергий // Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике / Под ред. Н.Н.Боголюбова. М.: Энергоиздат, 1986. С. 112–119.



Наконец, нельзя не отметить цикл работ, посвященных численному решению квантово-механической задачи трех тел и их приложению в проблеме мюонного катализа, в котором участвовали сотрудники лаборатории профессор И.В.Пузынин, д.ф.-м.н. Т.П.Пузынина и др. Высокую оценку этих работ дал член-корреспондент АН СССР В.П.Джелепов<sup>1-3</sup>. Кроме этого, цикл был отмечен первой премией на конкурсе работ ОИЯИ.

Направление «Математическая обработка экспериментальных данных» включало построение больших систем программ обработки информации.

Здесь следует отметить систему автоматизации обработки спектрометрической информации, в разработке которой принимала участие группа сотрудников лаборатории под руководством к.ф.-м.н. Л.С.Нефедьевой. Эти разработки были отмечены медалями ВДНХ СССР и премией Совета Министров СССР.

Для обработки फिल्मовой информации была разработана модульная система «Гидра», позволяющая генерировать текст программы для обработки данных в конкретной ситуации по информации о типе эксперимента, составе экспериментального оборудования, типе ЭВМ, об алгоритме обработки. В этих разработках активное участие принимала группа сотрудников лаборатории под руководством к.ф.-м.н. В.Г.Иванова.

Фундаментальный вклад в разработку систем обработки экспериментальных данных (бесфильмовый съем информации) в физике частиц внес коллектив сотрудников лаборатории под руководством профессора И.М.Иванченко. В составе различных экспериментальных групп ряд членов этого коллектива десять (!) раз отмечались премиями ОИЯИ.

Бурное развитие в течение последнего десятилетия информационных технологий выдвинуло на первый план новые задачи. Одна из них заключалась в освоении и модернизации комплексов программ, ставших достоянием научного сообщества, внедрение в них новейших математических методов, отвечающих потребностям физических исследований.

В этой ситуации естественно было объединить опыт разработки и развития численных методов и создания больших систем программ в рамках единого научного направления.

Отметим некоторые области исследований:

- *Развитие методов моделирования и обработки экспериментальных данных*

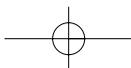
В настоящее время интенсивно развиваются новые подходы к построению математических моделей и методов анализа данных наблюдений: клеточные автоматы, искусственные нейронные сети, фрактальный анализ, вейвлет-преобразования.

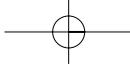
---

<sup>1</sup> Джелепов В.П., Пономарев Л.И. Мюонный катализ ядерных реакций синтеза // Объединенный институт ядерных исследований (1956–1986) / Под общей ред. акад. Н.Н.Боголюбова. Дубна, 1986. С. 168–171.

<sup>2</sup> Джелепов В.П., Фильченков В.В. Экспериментальное исследование явления резонансного образования мюонных молекул  $dd\mu$  и  $d\mu$  и  $\mu$ -катализа на синхроциклотроне ОИЯИ // Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике / Под ред. Н.Н.Боголюбова. М.: Энергоиздат, 1986. С. 175–185.

<sup>3</sup> Джелепов В.П. Лаборатория ядерных проблем // ОИЯИ 40. Хроника, воспоминания, размышления / Под ред. В.Г.Кадышевского, А.Н.Сисакяна, В.М.Жабицкого. Дубна, 1996. С. 79–108.





В лаборатории проводится внедрение этих методов не только в комплексы программ для моделирования физических процессов и экспериментальных установок и системы для анализа экспериментальных данных, но и в задачи контроля и защиты сетевой информации. Руководит этими работами д.ф.-м.н. В.В.Иванов. Большой вклад в развитие этих методов для обработки экспериментальной информации внес профессор Г.А.Ососков. Цикл работ «Искусственные нейронные сети и клеточные автоматы в экспериментальной физике» отмечен в 1997 году первой премией на конкурсе работ ОИЯИ. Цикл работ «Статистическая модель информационного трафика» в 2002 году отмечен второй премией.

Дальнейшее развитие получил комплекс программ КАСКАД, позволяющий моделировать разнообразные ядерно-физические процессы, инициируемые адронами и ионами различных энергий в сложных по химическому составу гетерогенных делящихся и неделящихся средах. Помимо каскадной модели получила развитие модель квантовой молекулярной динамики. Одно из главных приложений этих моделей — расчеты параметров различных вариантов электроядерных установок. В этих работах активно участвовали сотрудники лаборатории под руководством профессора В.С.Барашенкова и доктора А.Полянского.

- *Создание методов и численных алгоритмов для расчетов магнитных полей и транспорта пучков частиц*

Под руководством профессора Е.П.Жидкова продолжались работы по созданию методов решения нелинейных задач магнитостатики в трехмерных областях, ориентированных на современные многопроцессорные и векторно-параллельные вычислительные системы. Одним из основных приложений явились расчеты магнитной системы экспериментальной установки ALICE. Большой вклад в развитие этой области внесли д.ф.-м.н. П.Г.Акишин и к.ф.-м.н. О.И. и М.Б.Юлдашевы.

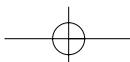
- *Создание систем обработки экспериментальных данных в физике частиц, включая развитие алгоритмов, программного обеспечения и архитектуры вычислительных кластеров*

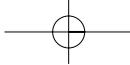
В последнее время создана распределенная система CHARМ для обработки и анализа данных в экспериментах по физике частиц. Система предназначена для эффективного решения двуединой задачи: обработки большого объема информации и поддержки высокой скорости обработки на основе распределенной вычислительной системы.

Развитие и применение этой системы было успешно выполнено в рамках коллаборации EXCHARМ. Автором идеологии и руководителем разработок является профессор И.М.Иванченко.

- *Создание численных методов и комплексов программ для математического моделирования сложных физических систем*

Основным подходом для разработки алгоритмов численного исследования переходных и критических процессов в математических моделях сложных систем является обобщенный непрерывный аналог метода Ньютона (НАМН). Этот подход интенсивно развивается в лаборатории в течение уже тридцати лет. За это время усилиями





группы сотрудников ОИЯИ под руководством профессора И.В.Пузынина метод превратился в мощный инструмент построения эффективных вычислительных схем для решения разнообразных нелинейных задач, возникающих в физике. Сейчас можно с уверенностью сказать, что разработан качественно новый, по сравнению с первоначальным вариантом НАМН, подход к созданию алгоритмов для численного анализа сложных многопараметрических нелинейных моделей физики.

Создание этого подхода явилось во многом продуктом опыта решения разнообразных практических задач. Это сингулярные спектральные задачи теории мезокатализа и теории ядра, это нелинейные полевые модели – потенциальные модели КХД, модели полярона, модели джозефсоновских переходов и другие. Поэтому в разрабатываемом подходе, наряду с идеями НАМН, нашли отражение наиболее привлекательные стороны известных методов решения задач физики. Это схемы теории возмущений, метод продолжения по параметру, метод эволюции по константе связи.

В разработанных итерационных схемах оптимизируется сходимость, в определенном смысле решается задача выбора начальных приближений и упрощается решение линейной задачи относительно итерационных поправок. Более того, возможно построение итерационного процесса без обращения линейного оператора в этой задаче. Развитые вычислительные схемы обладают свойствами таких известных методов, как метод расщепления, многосеточные методы, некоторые методы регуляризации.

В спектральных задачах обобщение НАМН может служить единой теоретической основой описания ряда известных методов.

- *Развитие методов, алгоритмов и пакетов программ компьютерной алгебры*

Работы в этой области ведутся в двух направлениях.

Во-первых, обеспечение сопровождения и развития таких пакетов компьютерной алгебры, как Maple, Mathematica, Reduce, Form; обеспечение пользователей информацией о символьных методах, алгоритмах и программном обеспечении.

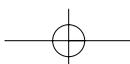
Во-вторых, разработки прикладных алгоритмов, связанных с символьным решением систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Здесь одним из главных являются методы построения инволютивных базисов для приведения систем к соответствующему каноническому виду.

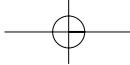
Эти работы возглавляет профессор В.П.Гердт.

## **7. Экспериментальные исследования: исследование структуры дейтрона в соударениях релятивистских ядер**

В новую лабораторию – ЛВТА – вместе с М.Г.Мещеряковым перешла его научно-исследовательская группа во главе с Леонидом Степановичем Ажгиреем, вместе с которой он более десяти лет проводил цикл работ по изучению структуры дейтрона на синхроциклотроне ЛЯП. Таким образом, лаборатория, ориентированная на поддержку физической программы ОИЯИ, непосредственно в ней участвовала. Ниже приводится обзор этих работ, составленный Л.С.Ажгиреем.

Дейтрон является простейшим ядром, состоящим из двух нуклонов: протона и нейтрона. Поэтому, с одной стороны, он представляет собой прекрасный инструмент





для исследования механизма ядерных реакций, с другой — превосходную «лабораторию» для изучения моделей, в которых ядерные взаимодействия объясняются на основе обмена мезонами.

Первое открытие, сделанное в ОИЯИ в 1957 году, также связано с дейтроном, — это было наблюдение прямого выбивания дейтронов из атомных ядер протонами, ускоренными на шестиметровом синхроциклотроне. Явление прямого выбивания дейтронов<sup>1</sup> было обнаружено сотрудниками группы М.Г.Мещерякова в ходе систематических исследований импульсных спектров вторичных частиц, испускаемых в результате бомбардировки атомных ядер протонами с энергией 675 МэВ.

В описываемом эксперименте коллимированный пучок протонов падал на поочередно устанавливаемые в него мишени из  $H_2O$ ,  $D_2O$ , Li, Be и C. Вторичные частицы, испущенные из мишени под углом  $7,6^\circ$ , выделялись системой коллиматоров и, пройдя анализирующее магнитное поле, регистрировались телескопом сцинтилляционных счетчиков. Вторичные протоны и дейтроны разделялись по пробегу в медном фильтре.

Спектр вторичных частиц, испущенных в соударениях протонов с ядрами лития, показан на рис. 5.

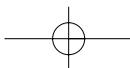
Здесь интенсивный пик отвечает протонам, дифракционно рассеянным на ядре, а примыкающий к нему слева выступ обусловлен протонами, испытавшими квазиупругое рассеяние на нуклонах внутри ядра. Правое «крыло» спектра показано со 100-кратным увеличением. На врезке приведен пик дейтронов, идентифицированных по пробегу в фильтре (пробег дейтронов с определенным импульсом меньше, чем пробег протонов с тем же импульсом). Анализ полученных данных привел к заключению, что зарегистрированные дейтроны образуются в результате почти упругих соударений налетающих протонов с квазидейтронными группами внутри ядер. Результаты этих опытов через 10 лет подтверждены в экспериментах на других ускорителях, и обнаруженное явление было прослежено вплоть до 4,3 ГэВ/с.

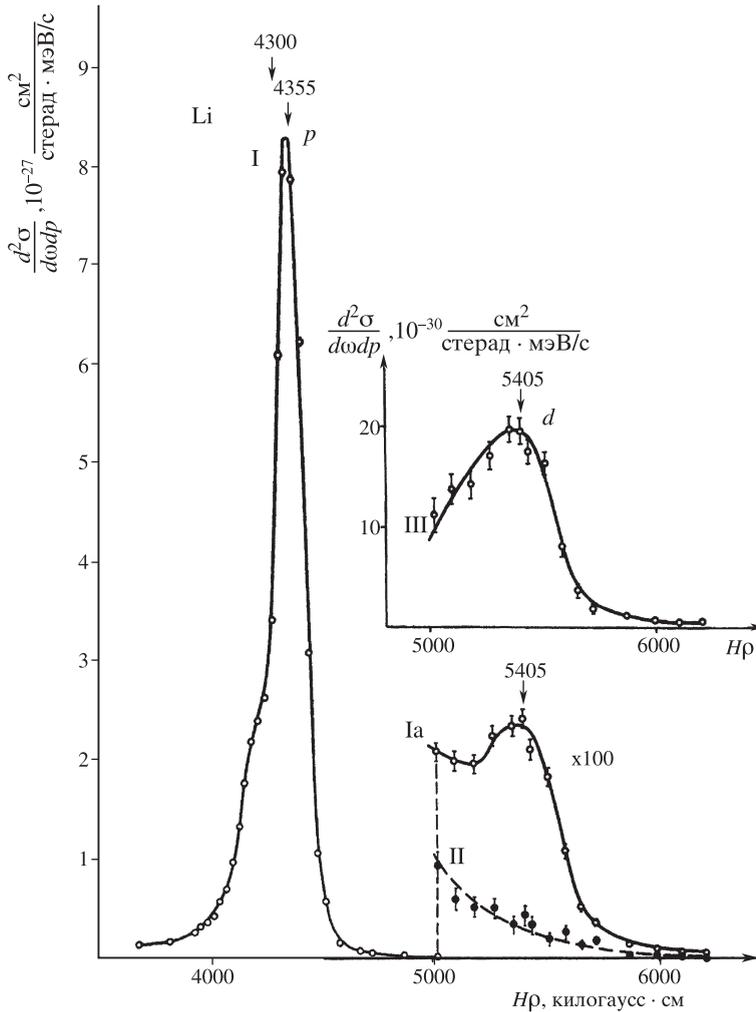
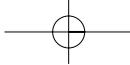
Обнаруженное явление представлялось крайне удивительным, поскольку дейтрон представляет собой довольно «рыхлую» систему, а передаваемая паре нуклонов энергия в сотни раз превышала энергию связи нуклонов в дейтроне. Для интерпретации результатов описанных экспериментов Д.И.Блохинцев сформулировал так называемую модель флуктонов<sup>2</sup>, в которой предполагалось, что вследствие флуктуаций плотности ядерного вещества внутри ядер возможно возникновение кратковременных тесных скоплений нуклонов, которые могут выбрасываться из ядра в виде отдельной частицы при соударении с нуклоном. Гипотеза о флуктонах была высказана Д.И.Блохинцевым задолго до открытия кварковой структуры адронов. В настоящее время флуктоны принято рассматривать как многокварковые образования, своеобразные «кварковые мешки».

Далее в опытах по исследованию процесса образования заряженных  $\pi$ -мезонов на ядрах углерода протонами с энергией 670 МэВ, выполненных под руководством М.Г.Мещерякова, было показано, что «соударения налетающих протонов внутри

<sup>1</sup> Ажгирей Л.С., Взоров И.К., Зрелов В.П., Мещеряков М.Г., Неганов Б.С., Шабудин А.Ф. // ЖЭТФ. 1957. № 33. С. 1185.

<sup>2</sup> Блохинцев Д.И. // ЖЭТФ 1957. № 33. С. 1295.



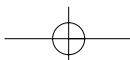


**Рис. 5.** Импульсный спектр вторичных частиц от  $p$ -Li соударений под углом  $7,6^\circ$  при 675 МэВ.

I и Ia – суммарный спектр вторичных частиц; II – спектр протонов (ординаты для Ia и II увеличены в 100 раз); III – спектр дейтронов

ядер с группами нуклонов, обладающих большими относительными импульсами, иногда сопровождаются образованием  $\pi$ -мезонов». По существу, это явилось первым экспериментальным наблюдением «кумулятивного процесса». Впоследствии интенсивные исследования кумулятивных процессов проводились А.М.Балдиным с сотрудниками на синхрофазотроне ОИЯИ и Г.А.Лексиним с коллегами в ИТЭФ.

Одним из методов получения информации о структуре составных объектов (и простейшего из них – дейтрона) является исследование импульсных спектров продуктов фрагментации этих объектов. На ранних этапах исследования структуры

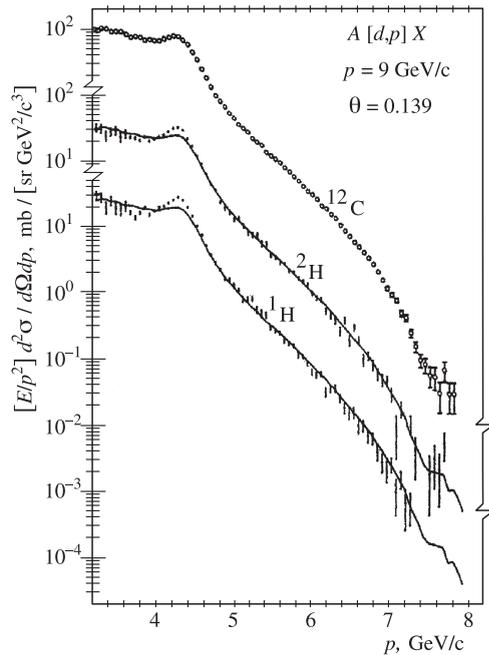


дейтрона этим методом, когда импульсы вторичных частиц измерялись в относительно узкой области, представлялось, что такого рода данные о реакции  $(d, p)$  можно описать на основе модели многократного нуклон-нуклонного рассеяния с использованием известных волновых функций дейтрона и лоренцовского преобразования импульсов нуклонов внутри дейтрона при переходе из системы покоя движущегося дейтрона в лабораторную систему. Более детальное исследование спектров протонов от развала релятивистских дейтронов, охватывающее практически весь кинематически доступный интервал импульсов вторичных частиц, стало возможно после сооружения на канале медленного вывода пучка дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ прецизионного магнитного спектрометра с проволочными камерами на линии с ЭВМ. С помощью новой экспериментальной установки были проведены систематические измерения импульсных спектров протонов, вылетающих во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами водорода, дейтерия и углерода под углами 103, 139 и 157 миллирадиан. Условия этих экспериментов выбраны таким образом, чтобы регистрируемые протоны обладали наибольшими достижимыми поперечными импульсами (в антилабораторной системе координат, т. е. в системе покоя дейтрона регистрируемые протоны испускались под углами вблизи  $90^\circ$ ).

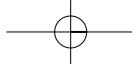
Импульсные спектры протонов, испускаемых под углом 139 миллирадиан во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами водорода, дейтерия и углерода, в качестве примера накопленных данных показаны на рис. 6.

Отметим, что на протяжении исследованного импульсного интервала выходы вторичных протонов падают более чем на четыре порядка по отношению к их выходам в максимумах спектров; спектры вторичных протонов измерены вплоть до кинематической границы их вылета. Сплошные кривые на рис.6 представляют собой результат сплайн-аппроксимации импульсного спектра для углеродной мишени, наложенный на спектры для водорода и дейтерия. Видно, что формы спектров для разных мишеней, за исключением узкого участка вблизи максимумов, совпадают. Это означает, что форма высокоимпульсных частей спектров зависит только от свойств фрагментирующего ядра — дейтрона.

Извлечение информации о структуре дейтрона из результатов опытов, в которых дейтрон быстро движется, требует релятивистского рассмотрения *ab ovo*, как это де-



**Рис. 6.** Импульсные спектры вторичных протонов, зарегистрированных под углом 139 мрад во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  и  $^{12}\text{C}$



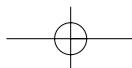
лается и в релятивистских моделях жестких соударений составных адронов. Ключевым элементом в этом подходе является понятие системы бесконечного импульса, тесно связанное с динамикой светового фронта, впервые рассмотренной Дираком еще в 1949 году. Качественно идея состоит в том, что если составная система рассматривается из быстро движущейся системы, взаимодействия между конститuentами замедляются из-за уширения времени, так что внутренняя динамика, по существу, сводится к динамике почти свободных конститuentов. Одно из преимуществ динамики светового фронта по сравнению с обычной — динамикой мгновенной формы — состоит в том, что в ней из вакуума не рождаются пары частица-античастица (т.е. в этом случае вакуум является «пустым» для массивных частиц).

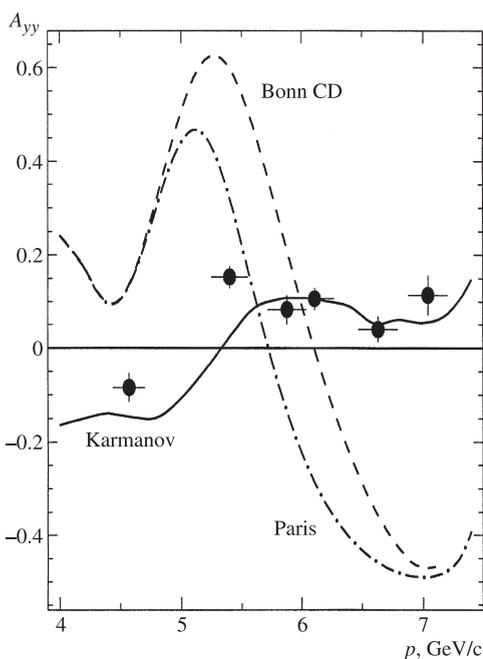
Все накопленные данные об инвариантных дифференциальных сечениях реакции  $(d, p)$  при энергиях дейтронов в области от 3,5 до 9 ГэВ с испусканием протонов с различными поперечными импульсами, от 0 до 1,1 ГэВ/с, удается удовлетворительно описать в рамках релятивистской модели жесткого рассеяния, основанной на динамике светового фронта, с волновыми функциями дейтрона, полученными из стандартных нерелятивистских волновых функций путем кинематического преобразования от переменных мгновенной формы динамики к переменным световой формы. В этой модели основные вклады в выход протонов дают прямая фрагментация дейтрона и процессы рассеяния нуклона дейтрона на нуклоне мишени.

Очередной этап исследования структуры дейтрона на малых расстояниях между нуклонами стал возможен после создания на синхрофазотроне ОИЯИ уникального пучка поляризованных дейтронов. Новые методические возможности позволили проводить измерения спиновых характеристик реакций с участием поляризованных дейтронов. На рис. 7, как один из примеров результатов таких измерений, приведены данные о тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции  $^{12}\text{C}(d, p)X$  при начальном импульсе дейтронов 9 ГэВ/с и угле испускания протонов 85 миллирадиан<sup>1</sup>. Кривыми показаны результаты вычислений этого параметра в рамках модели жестких соударений с использованием различных волновых функций дейтрона. Обратим внимание на то, что кривые, вычисленные с волновыми функциями для парижского (штрихпунктирная кривая) и боннского (штриховая кривая) потенциалов, не согласуются с экспериментальными данными. Это же характерно и для других данных, например, для данных о тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в упругом  $(dp)$ -рассеянии назад и в реакции  $(d, p)$  с вылетом протонов под  $0^\circ$ .

Таким образом, результаты выполненных в Сакле и Дубне экспериментов заставили усомниться в правильности описания структуры дейтрона на малых расстояниях с помощью волновых функций, полученных путем кинематического преобразования переменных. В частности, анализ данных о тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции фрагментации дейтронов с испусканием протонов с боль-

<sup>1</sup> Afanasief S.V., Azhgirey L.S., Arkhipov V.V., Bondarev V.K., Chernykh E.V., Ehara M., Ershov V.P., Filipov G., Fimushkin V.V., Fukui S., Hasegava S., Hasegava T., Horikava N., Isupov A.Yu., Iwata T., Kageya T., Kashirin V.A., Kawano M., Khrenov A.N., Kirillov A.D., Kolesnikov V.I., Ladygin V.P., Litvinenko A.G., Malakhov A.I., Matsuda T., Migulina I.I., Nakayama H., Nikiforov A.S., Nomofilov A.A., Osada E., Penev V.N., Pilipenko Yu.K., Reznikov S.G., Rukoyatkin P.A., Semenov A.Yu., Semenova I.A., Sharov V.I., Stoletov G.D., Strunov L.N., Takabyashi N., Wakai A., Yudin N.P., Zaporozhets S.A., Zhmyrov V.N., Zolin L.S. // Phys. Lett. B 434. 1998. P. 21–27.





**Рис. 7.** Тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  реакции фрагментации дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с испусканием протонов под углом 85 миллирадиан в зависимости от импульса регистрируемых протонов. Экспериментальные данные показаны на графике точками. Расчеты в рамках динамики светового фронта выполнены<sup>1</sup> с волновыми функциями дейтрона для парижского (штрихпунктирная кривая) и боннского (штриховая кривая) потенциалов, а также с волновой функцией Карманова (сплошная кривая)

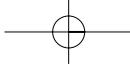
шими поперечными импульсами, наряду с некоторыми другими фактами, навел на мысль о необходимости введения дополнительной переменной для описания структуры релятивистского дейтрона.

Учитывая сложившуюся ситуацию, было выдвинуто предположение, что основную проблему в описании экспериментальных данных, полученных с пучками поляризованных дейтронов, можно решить, правильно учтя релятивистские свойства дейтрона и не усложняя механизм реакции<sup>2</sup>. Релятивистское описание дейтрона в рамках динамики светового фронта было развито Кармановым и др. В этом подходе релятивистский дейтрон описывается волновой функцией более общего вида: теперь она зависит от двух импульсов – продольного и поперечного. Вследствие этого релятивистский дейтрон описывается шестью инвариантными функциями вместо двух в нерелятивистском случае. В нерелятивистском пределе две компоненты внутреннего импульса сворачиваются в его модуль, поэтому нерелятивистская функция зависит только от одной переменной. Новое соотношение между продольной и поперечной компонентами импульса внутриядерного движения отличается от того, которое диктуется суперпозицией  $S$ - и  $D$ -волн в нерелятивистских волновых функциях дейтрона.

Результаты расчетов параметра  $A_{yy}$  с релятивистской волновой функцией Карманова показаны на рис. 7 сплошной кривой. Видно, что импульсная зависимость, вычисленная с релятивистской волновой функцией, очень близка к эксперименталь-

<sup>1</sup> *Azhgirey L.S., Yudin N.P.* Preprint arXiv:nucl-th/0212033 (2002); Preprint arXiv:nucl-th/0311052 (2003).

<sup>2</sup> Там же.



ным точкам, тогда как кривые, вычисленные со стандартными нерелятивистскими волновыми функциями, находятся в резком противоречии с данными.

Анализ накопленных экспериментальных данных об инвариантном дифференциальном сечении и тензорной анализирующей способности процесса фрагментации релятивистских дейтронов на ядрах свидетельствует о том, что в подходе динамики светового фронта нуклоны в дейтроне остаются эффективными степенями свободы и, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до импульсов внутреннего движения 1 ГэВ/с.

Полученные результаты могут иметь далеко идущие последствия как для понимания структуры дейтрона на малых расстояниях, так и для интерпретации механизмов реакции фрагментации релятивистских дейтронов. Действительно, довольно неожиданным оказывается, что вплоть до малых расстояний между нуклонами, соответствующих внутренним импульсам 0,5–0,8 ГэВ/с, в световой форме квантовой механики дейтрон можно рассматривать как двухнуклонную систему. Такое же заключение было сделано ранее и в работе, посвященной исследованию фрагментации дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с в протоны с поперечными импульсами 0,5–1 ГэВ/с, где указывалось, что нуклоны в дейтроне, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до относительных импульсов 1 ГэВ/с.

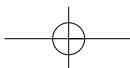
Второй важный вывод, вытекающий из этих исследований, состоит в том, что в реакции фрагментации релятивистских дейтронов очень быстро становятся существенными релятивистские эффекты, которые наиболее просто можно учесть при рассмотрении механизма процесса в квантовой механике светового фронта, не вводя каких-либо дополнительных степеней свободы.

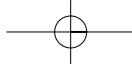
## **8. Электроядерный способ производства энергии – «электрояд»**

Другая физическая тематика, которой активно занимались физики и математики ЛВТА, – это проблема, известная под названием «Электроядерный способ производства энергии» (электрояд). Работы в этом направлении ведутся в нескольких лабораториях ОИЯИ. Работы ЛВТА, в основном, связаны с математическим моделированием соответствующих физических процессов. В данном пункте В.С.Барашенковым излагается современный взгляд на это научно-техническое направление.

### ***Плюсы и минусы***

Урановые и ториевые руды – важнейшие ресурсы нашей планеты. В 2003 году свыше 17% мирового производства электроэнергии приходилось на атомные электростанции, использующие урановое горючее. В некоторых странах доля атомного электричества значительно больше. Например, наша северная соседка Швеция производит на атомных станциях половину всей своей электроэнергии, Франция – более трех четвертей. В Китае недавно принята программа увеличения в 5–6 раз вклада атомных электростанций (АЭС). Атомная энергетика развивается в Индии, где ее долгосрочные перспективы связываются с торием, которым очень богата эта страна. Заметную, хотя пока и неопределяющую роль, атомные электростанции играют в США и России.





Как и любое крупное производство, АЭС приносят в нашу жизнь новые специфические угрозы; и имеются противники, настаивающие на их замене иными, более привычными нам источниками энергии. Особенно привлекательными выглядят возобновляемые источники — гидро- и геотермические станции, энергия солнца и ветра, использование биомассы в качестве топлива. Сегодня суммарный вклад таких источников энергии составляет около 20%. Несмотря на перспективные усовершенствования в этой области, трудно рассчитывать, что их удельный вес увеличится настолько, что сможет удовлетворить наши быстро возрастающие энергетические потребности, которые, по данным Мирового энергетического союза, в ближайшие 10 лет возрастут не менее чем на 50–75%.

Оценки показывают, что в ближайшие 20–30 лет львиную долю энергии по-прежнему будет давать углеводородное топливо. Вследствие чего уже к началу следующего десятилетия содержание углекислого газа в земной атмосфере возрастет по сравнению с 1990 годом на 50–60%. Если не принять ограничивающих мер, оно далее будет возрастать с неменьшим темпом, что грозит глобальными экологическими катаклизмами.

Все это убеждает в том, что, несмотря на имеющиеся в обществе опасения, атомная энергетика также будет развиваться быстрыми темпами, особенно если принять во внимание, что киловатт атомной электроэнергии стоит значительно дешевле углеводородной.

Однако каковы ресурсы АЭС? Что делать с нарабатываемыми ими чрезвычайно опасными радиоактивными «шлаками»? Можно ли исключить несанкционированное использование накапливающихся в реакторах легкоделящихся изотопов?

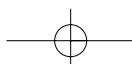
Энергия в реакторах АЭС выделяется в реакциях деления, что сопровождается рождением большого числа нейтронов, часть которых вызывает последующее деление урановых ядер, некоторые гибнут в конструктивных материалах, а остальные поглощаются ядрами урана, превращая их в ядра плутония — легко делящуюся «ядерную взрывчатку». Все это сегодня хорошо известно. Но вот что нужно иметь в виду.

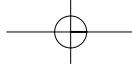
Во-первых, легко делится лишь один из изотопов, который в добываемом из руд уране составляет всего лишь 0,7%. Остальная часть урана идет в отвал. Ее можно утилизировать только в так называемых быстрых реакторах, использующих высокоэнергетическую часть спектра деления. Однако и в этом случае нельзя обойтись без значительной примеси дефицитного легко делящегося уранового изотопа или плутония (в стандартном топливе быстрых реакторов MOX содержится около 25% двуокиси  $\text{PuO}_2$  и 75% двуокиси «инертного»  $^{238}\text{U}$ ).

Во-вторых, в реакторе должен соблюдаться очень строгий баланс рождающихся и поглощенных нейтронов. Это характеризуется «коэффициентом мультипликации нейтронов», равным отношению чисел нейтронов в двух последовательных поколениях  $n-1$  и  $n$ :

$$K_{eff} = N_{n-1}/N_n.$$

Если  $K_{eff} < 1$  — реакция затухает, если  $K_{eff} > 1$  — реализуется взрывной режим разгонки реактора. Любая АЭС связана с потенциальной опасностью перехода через «красную черту» в область  $K_{eff} > 1$ . Наконец, в результате поглощения нескольких нейтронов образуются тяжелые трансурановые ядра, радиоактивность которых со-





храняется в течение сотен тысяч и даже миллионов лет. Создавать и эксплуатировать «могильники» для таких ядер — дело дорогое и с непредсказуемыми последствиями, ведь прогнозы каких-либо местных земных условий на миллионы лет вперед весьма рискованны. Как однажды пошутил Д.И. Блохинцев, руководивший проектированием и строительством первой атомной электростанции, иметь дело с атомными реакторами — «это все равно, что целоваться с тигром». В принципе можно, но делать это нужно крайне осторожно.

Тем не менее есть обнадеживающий путь, интерес к которому Д.И. Блохинцев сохранял до конца своих дней.

### *Гибрид реактора с ускорителем*

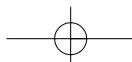
Известно, что идею электроядерных устройств полвека назад первыми предложили Лоуренс в США и академик Семенов в России. Это было время пика холодной войны, и многие разделы ядерной физики, тем более имевшие отношение к ее военным применениям, оставались глубоко засекреченными. Даже само слово «реактор» заменялось кодовым термином «кристаллизатор», а нейтроны назывались метеоритами или нулевыми точками. Неудивительно, что некоторые важные открытия и идеи независимо повторялись в различных местах. Идея объединить две основные «атомные машины» — ускоритель частиц и урановый реактор — родилась и в небольшом поселке Обнинск под Малоярославцем, где располагался скрытый лесным массивом от посторонних глаз Физико-энергетический институт. Сегодня мало кто знает, что этот широко известный ныне реакторный центр начинался с разработки ускорителей, и Д.И. Блохинцев, ставший впоследствии его директором и одним из строителей первой атомной электростанции, принимал в этом активное участие. Поэтому идея «электрояда» — размножения в урановом блоке лавины нейтронов, родившихся вследствие дробления ядер урана пучком разогнанных ускорителем частиц, была вполне закономерной.

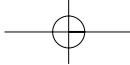
В таблице 2 показано, сколько нейтронов и заряженных частиц рождает при столкновении с ядром урана протон с энергией  $E$ , видно, что в области  $E \approx 1$  ГэВ их число, в основном нейтронов, составляет несколько десятков. Конечно, 50 лет назад еще не имелось таких точных данных, они появились значительно позднее, но были известны выходы частиц при столкновениях протонов с легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии и приближенно их можно было экстраполировать к изотопам урана.

Следовало ожидать, что родившиеся заряженные частицы будут быстро терять свою энергию при взаимодействии с электронными оболочками атомов, а не имеющие электрического заряда нейтроны будут тратить энергию на создание каскада, цепочек следующих друг за другом расщеплений, порождая разрастающийся ливень за-

**Таблица 2. Число частиц, рождающихся в столкновении  $p + {}^{238}\text{U}$  при энергии  $E$  ( $N_n$  — нейтроны,  $N_{tot}$  — суммарное число нейтральных и заряженных частиц)**

$E$ , ГэВ	0,2	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0
$N_n$	12	16	18	21	24	27
$N_{tot}$	15	18	23	26	33	39





медляющих нейтронов, которые в конце концов будут поглощаться ядрами урана  $^{238}\text{U}$ , трансмутируя их в ядра плутония.

Оценки предсказывали, что каждый первичный протон с энергией 0,5–1,0 ГэВ должен родить много десятков ядер плутония, нарабатывая оружейный материал, что в 50-х годах было жизненно важно, и многократно увеличивая, при массовом использовании электроядерных установок, ресурс атомной энергетики. Правда, для наработки промышленно значимых количеств плутония требовался ускоритель с фантастическим по тем времена (да и сегодня!) током в сотню мА, однако вопросы обороны заставляли прорабатывать и такую, крайне трудную, но в принципе достижимую возможность.

Вместе с тем просматривалось и более простое применение «электрояда» — для снижения коэффициента  $K_{eff}$  и повышения тем самым безопасности реактора, когда внешняя подсветка нейтронами позволяет работать ниже «красной черты», а выключение тока ускорителя гарантирует быструю остановку реактора. Для этого можно было надеяться использовать ускорители с несколько меньшими токами.

#### **Фабрики плутония**

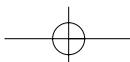
Переезд Д.И.Блохинцева в Дубну, где работал 660-МэВный протонный фазотрон и проектировалось строительство мощного импульсного реактора, открывало замечательные возможности для изучения электроядерной технологии. Здесь на пучке фазотрона группой В.И.Гольданского были выполнены эксперименты с огромным, 20-тонным, блоком урана. Выход нейтронов составлял около 70 нейтронов на один первичный протон, что было прекрасным подтверждением теоретических ожиданий. Нужно сказать, что измерения группы Гольданского до сих пор остаются уникальными — ни в России, ни за рубежом нет экспериментов с такими большими урановыми блоками.

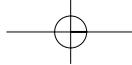
Поскольку дальнейшие эксперименты, включающие различные подкритические сборки с ураном, плутонием, различными типами теплоносителей и радиационной защиты, были сложны и дороги, по инициативе Блохинцева в Дубне начались работы по созданию математической модели электроядерного реактора. Такая модель была создана в начале 60-х годов и продолжает совершенствоваться до настоящего времени. В США с небольшим запозданием аналогичная модель была создана в Окриджской национальной лаборатории. Обе модели давали весьма близкие результаты.

Расчеты, приведенные в таблице 3, показывают, что даже в «чистом», добываемом непосредственно из руды уране, без дополнительной примеси  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ , что имеет место в промышленных реакторах, когда  $K_{eff}$  составляет всего лишь 0,3–0,4, уже можно осуществить самоподдерживающийся цикл. При этом производимая энергия не только достаточна для возмещения затрат на ускорение протонов (с учетом потерь, сопровождающих конверсию тепловой энергии в электрическую), но остается и значительный избыток ее. Энергетический выигрыш

$$G = (Q - E)/E$$

(где  $Q$  — выделяющееся тепло,  $E$  — энергия бомбардирующих протонов) становится значительно большим единицы уже при энергии в несколько сотен МэВ. В действи-





**Таблица 3. Выход ядер  $^{230}\text{Pu}$  и энергетический выигрыш в очень большом блоке естественного урана (в расчете на один бомбардирующий протон с энергией  $E$ )**

$E$ , ГэВ	$N_{\text{Pu}}$	$G$	$G_{\text{tot}}$
0,1	1,3	0,7	3,46
0,5	18	2,7	13
0,65	55	4,8	22,0
0,8	75	5,3	24,1
1,0	98	5,5	25,6
1,5	155	5,8	27,4
2,0	210	6,0	27,7

тельности энергетический выигрыш еще больше, если учесть тепло  $Q^*$ , выделяющееся при сжигании наработанного плутония в самой электроядерной установке или в реакторах других АЭС:

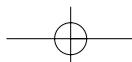
$$G_{\text{tot}} = G + Q^*/E.$$

Примесь легкоделящихся изотопов урана и плутония (например, при использовании стандартного топлива быстрых реакторов МОХ при  $K_{\text{eff}} = 0,97-0,98$ ) во много раз увеличивает выход плутония и энергетический выигрыш.

В начале 70-х годов П.Л. Кирилловым был организован в Обнинске «электроядерный семинар», куда съезжались физики из многих институтов. Результатом работ семинара явилась справка в Правительство с предложением более широко развернуть электроядерные исследования. Предложение было принято, и в качестве головной координирующей организации был выбран Московский институт экспериментальной и теоретической физики. Тем не менее, несмотря на многообещающие перспективы, электроядерные исследования продвигались довольно медленно. Отчасти благодаря тому что был найден весьма эффективный метод наработки  $^{235}\text{U}$ , путем центрифугирования, проблема ядерного горючего потеряла остроту, и тратить огромные средства на создание ультрасильноточных ускорителей представлялось нерациональным. В это время, задолго до Чернобыльской катастрофы, мало внимания уделялось повышению безопасности АЭС, чему могли бы помочь электроядерные системы, и все внимание было «заполяризовано» на производство возможно большего количества плутония. Был разгар холодной войны.

### **Новая стратегия**

Существенный перелом в отношении к электроядерным системам связан с именем Карло Руббиа, предложившего схему «один ускоритель – один безопасный подкритический реактор», потребляющий нарабатываемый им плутоний и трансмутирующий радиоактивные отходы, свои и, возможно, из реакторов других АЭС. Поскольку перед такими системами не стоит цель наработки излишнего плутония (холодная война к этому времени ушла в прошлое), то для функционирования таких систем



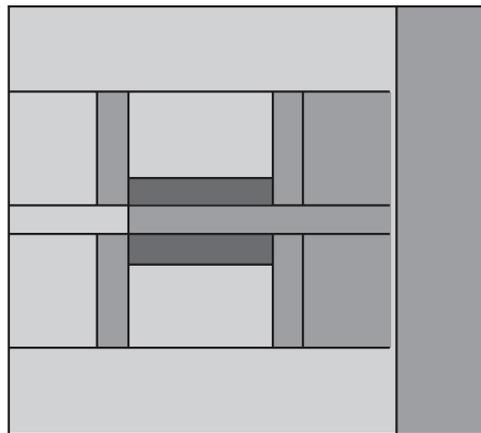
вполне достаточно 10–15 мА тока ускорителя, что в пределах современных технических возможностей. При этом мы фактически возвращаемся к идее УУР — управляемого ускорителем реактора, обсуждавшейся в начале 50-х годов в Обнинске. (Не зря говорится, что всякому овощу свое время!) По оценке К.Руббиа и его сотрудников, производство электроэнергии электроядерной АЭС будет в 2–3 раза дешевле, чем на электростанциях с углеводородным топливом. Не исключено, что эти оценки несколько оптимистичны, однако пока это единственная возможность избавиться от долгоживущих радиоактивных отходов. Это может компенсировать даже некоторое увеличение стоимости электроэнергии, если бы такое имело место.

В настоящее время в мире еще нет ни одной работающей электроядерной установки, однако такие устройства с различным уровнем тепловой мощности проектируются и уже близки к началу строительства в нескольких лабораториях.

На рис. 8 показан продольный разрез установки, которая в ближайшие 2–3 года будет создана в Дубне. Пучок протонов, ускоренных фазотроном до 660 МэВ, направляется в центр установки на цилиндрическую свинцовую мишень диаметром 8 см. Образовавшиеся в свинце каскадные частицы размножаются в окружающем слое из 354 кг топлива MOX.

Цилиндрический свинцовый рефлектор отражает «убегающие нейтроны», возвращая их в активную зону. Выделяющееся в установке тепло будет сниматься потоком воздуха, а в ее центральной, наиболее нагреваемой части, — потоком гелия. Установка окружена толстым слоем бетонной защиты. Кроме этого, она содержит еще и другие конструктивные детали, на которых мы не будем останавливаться.

Установка будет работать с  $K_{eff} \sim 0,94$ , что далеко от «красной черты», гарантирует полную безопасность и, в то же время, позволяет получить несколько десятков кВт тепловой энергии. Это сравнительно немного, благодаря чему выделяющееся тепло можно удалять продувкой воздуха или гелия, и вместе с тем этого вполне достаточно для большинства опытов. В экспериментах будут получены новые данные, необходимые для проектирования полномасштабных промышленных электроядерных АЭС. Проект поддержан Международным научно-техническим центром, выделившим для этого 1,2 миллиона долларов США.



**Рис. 8.** Один из вариантов конструкции создаваемой в Дубне электроядерной установки

**Какой должна быть электроядерная АЭС?**

Данные таблицы 4 показывают влияние ионизационных потерь на выход нейтронов и тепловыделение. Как видно, при небольших энергиях львиная доля энергии бомбардирующего протона тратится на ионизационные процессы. Тем не менее даже оставшаяся ее часть (всего 5–10%) оказывается достаточной для рождения интенсивной лавины нейтронов и значительного положительного баланса  $Q/E > 1$ . Энергетическая стоимость нейтрона и генерируемого тепла минимальна при  $E \sim 1$  ГэВ, когда издержки на ионизацию становятся почти постоянными, а быстро возрастающие затраты на рождение распадающихся мезонов еще невелики. Именно на энергию 1 ГэВ, как правило, и ориентируются проектируемые электроядерные АЭС. Однако энергетический оптимум очень широк и переход к энергиям в несколько сотен МэВ, где стоимость ускорителей намного меньше, хотя и снижает выход тепла и поток нейтронов, но не очень значительно. Например, на рис. 9 видно, что переход от  $E = 1$  ГэВ к  $E = 0,66$  ГэВ уменьшает величину энергетического выигрыша  $G$  по сравнению с его максимальным значением при  $E = 1$  ГэВ:

$$\Delta Q/E = G(E)/G(1 \text{ ГэВ}) = [Q(E) - E]/E$$

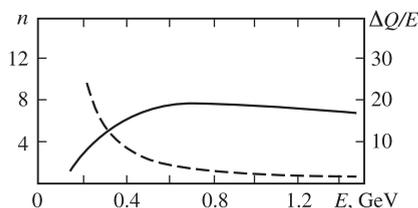
всего только примерно на 5%. Быстрое увеличение стоимости тепла и нейтронов наступает при  $E < 0,2-0,3$  ГэВ.

Приведенная на рис. 9 зависимость относится к одному из проработывавшихся в Дубне вариантов установки с  $K_{eff} \sim 0,94$ , однако она типична для всех электроядерных

**Таблица 4. Ионизационные потери  $\Delta E_n$  и тепловыделение  $Q$  в электроядерной установке с  $K_{eff} \sim 0,94$  (в расчете на единицу затрачиваемой энергии  $E$ )**

$E$ , ГэВ	$\Delta E_n/E$	$Q/E$
0,1	95	1,3
0,2	85	11,2
0,3	80	15,5
0,5	69	20,8
0,6	58	21,4
0,8	47	21,4
1,0	41	22,1
1,5	34	21,4
2,0	30	18,7

**Рис. 9.** Зависимость относительного выигрыша энергии  $\Delta Q/E$  от энергии бомбардирующего протона  $E$ . Пунктирная кривая – соответствующие значения компенсирующего коэффициента  $n(E)$ , показывающего, во сколько раз следует увеличить ток ускорителя, чтобы иметь те же значения  $\Delta Q/E$ , как и при  $E = 1$  ГэВ



установок с большими значениями  $K_{eff}$ , когда основной вклад в тепловыделение и генерацию нейтронов дает низкоэнергетическое деление и влияние ионизационных потерь не так существенно, как в случае малых  $K_{eff}$ .

Снижение тепловыделения при переходе к меньшим энергиям можно компенсировать соответствующим увеличением тока ускорителя, что при этих энергиях сделать значительно легче, чем при  $E = 1$  ГэВ. Другая возможность – использовать одновременно несколько ускорителей, что по стоимости не дороже сильноточного ускорителя с энергией 1 ГэВ, а с технологической точки зрения предпочтительнее, поскольку позволяет АЭС работать в непрерывном режиме без остановок на ремонт и профилактику единственного и весьма сложного ускорителя.

### *Ионные и электронные пучки*

Следует иметь в виду, что кроме протонов в электроядерных системах могут использоваться и другие типы бомбардирующих частиц. Прежде всего, это – дейтроны и более тяжелые ядра. Кроме протонов, они с самого начала имеют в своем составе не испытывающие ионизационных потерь нейтроны, и, можно думать, это даст дополнительный выигрыш в энергии. Расчеты показывают, что это действительно имеет место для дейтронов (таблица 5). При  $E = 1$  ГэВ дейтрон рождает на 10–15% больше нейтронов, чем протон, при меньших энергиях преимущества дейтронов становятся еще заметнее. Использование тяжелых ионов невыгодно, поскольку ионизационные потери приблизительно пропорциональны квадрату электрического заряда иона и изначальный избыток нейтронов не может их компенсировать. Правда, ситуация может измениться при очень высоких энергиях, когда вследствие релятивистских эффектов ионизационные потери снижаются и, кроме того, при столкновении сильно разогнанных ядер возможно их полное дробление на отдельные протоны и нейтроны. Но все это требует более детального теоретического, а главное, экспериментального изучения.

Бытует мнение, что пучки электронов заведомо непригодны для электроядерных установок – ионизационные потери электронов в сотни раз превосходят потери протонов и энергия пучка идет в основном на нагревание мишени. Однако ток электронных ускорителей может быть несравненно большим, чем у протонных, что позволяет достигнуть такого же выхода нейтронов, как и при бомбардировке мишени пучком протонов, а выделившуюся в мишени тепловую энергию можно трансформировать обратно в электрическую. При этих условиях электронные ускорители становятся вполне конкурентоспособными. Правда при этом нужно справиться с трудными инженерными проблемами устойчивости мишени и эффективного теплосъема. Для этого предлагается, например, использовать движущуюся со сверхзвуковой скоростью струю расплавленного свинца.

**Таблица 5. Число нейтронов, рождающихся в большом урановом блоке при облучении его протонами и ионами с энергией  $E = 1$  ГэВ**

Частица	P	D	$^4\text{He}$	$^{12}\text{C}$
$N$	99	1134	98	65

У электроядерных систем с электронными пучками в запасе есть еще один козырь. Протонные установки похожи на уродца с огромной головой — ускорителем, размером с двухэтажный дом, и маленьким телом — реактором метровых размеров. Электронные ускорители более компактны. В общем, тут много за и против и есть над чем подумать...

### **Уран или торий?**

Наряду с ураном, ториевые руды тоже являются ресурсом атомной энергетики. Делимость и энерговыделение у тория заметно меньше, чем у урана: число рождающихся нейтронов меньше примерно на 40%, а энергетический избыток (таблица 6) составляет только пятую часть того, что имеется в урановом блоке. Правда эти данные относятся к естественной смеси изотопов урана, при сравнении с  $^{238}\text{U}$  различие меньше:  $G_{\text{Th}}/G_{\text{U}}$  при энергиях пучка, больших нескольких сотен МэВ, составляет уже около  $1/3$ , а не  $1/5$ . Это не очень много, но при энергиях  $E > 0,2-0,3$  ГэВ избыток тепла, тем не менее, становится значительным, а разведанные запасы ториевых руд весьма велики.

У тория есть еще одно важное преимущество. В урановом реакторе образуется преимущественно один изотоп плутония — легко делящийся  $^{239}\text{Pu}$ , примесь других изотопов, мешающих развитию цепной реакции, невелика, поэтому даже «грязный», неочищенный от них плутоний пригоден для атомного оружия. А поскольку плутоний по химическим свойствам отличается от урана, извлечь его из топлива АЭС не такая уж сложная задача. В ториевых реакторах, при захвате нейтронов, рождается сложная смесь изотопов урана (таблица 7), в которой, наряду с легко делящимися изотопами (например,  $^{238}\text{U}$ ), присутствует большое количество гасящих цепную реакцию изотопов. Для изготовления взрывающихся «изделий» необходима сепарация изотопов, а это — чрезвычайно трудная задача, поскольку химические свойства изотопов одинаковы.

В электроядерной установке изотопы урана будут выжигаться наравне с исходным  $^{232}\text{Th}$ , при этом легко делящиеся изотопы будут увеличивать выход тепла. Оценки показывают, что накопление 3% изотопа  $^{233}\text{U}$  увеличивает выход тепла более чем в 30

**Таблица 6. Сравнение выхода нейтронов  $N$  и выигрыша энергии  $G$  в больших блоках урана и тория, облучаемых протонами с энергией  $E$  (Индексами «U» и «Th» отмечены величины для урана и тория)**

$E, \text{ГэВ}$	$N_{\text{Th}}/N_{\text{U}}$	$G_{\text{Th}}/G_{\text{U}}$	$G_{\text{Th}}$
0,1	0,62	0,0	0,0
0,2	0,65	0,14	0,25
0,35	0,64	0,15	0,40
0,66	0,62	0,18	0,85
1,0	0,62	0,19	1,0
1,5	0,62	0,20	1,15
2,0	0,62	0,20	1,24

Таблица 7. Изотопы, образующиеся в ториевом реакторе

Изотоп	$^{233}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$
Выход	44	360	4	22	0,1	$\sim 10^{-2}$

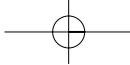
раз. Для стран с большими запасами тория его использование в электроядерных АЭС представляется весьма перспективным.

#### *Реактор в реакторе*

Такая идея, если судить по журнальным статьям, была высказана впервые физиками Сарова (Арзамаса-16, если использовать его более звонкое и привычное для физиков кодовое название, в течение многих лет бытовавшее в Советском Союзе). Сильноточные ускорители весьма сложны и дороги, поэтому разработка электроядерных установок, в которых можно было бы ограничиться токами всего лишь в несколько МА или еще меньшими, — вдохновляющая задача. Для этого можно поступить следующим образом: окружить активную зону с ядерным горючим слоем вещества, которое по-разному пропускает нейтроны различных энергий, например пропускает быстрые и захватывает медленные. Такие ядерные вентили позволят создавать системы, похожие по своему устройству на русские матрешки. В центре располагается реактор, под-



Участники конференции «Современные проблемы вычислительной физики» (1998 г.)



жигаемый внешним протонным пучком и многократно усиливающий поток рожденных в мишени быстрых нейтронов, которые в свою очередь поджигают следующий, находящийся за вентильным слоем реактор, и так далее. Первичный пучок протонов в этом случае может быть значительно меньшей интенсивности, чем в однореакторных системах.

Выполненное недавно совместно в Дубне и в Ереване математическое моделирование электроядерной системы с внутренним реактором на быстрых нейтронах и внешним на медленных (тепловых) нейтронах подтвердило эффективность такого подхода, хотя тут еще много физических и технологических вопросов.

### *Что же дальше...*

Можно быть уверенным, что замедлившийся после Чернобыльской аварии темп строительства атомных электростанций ускорится уже в ближайшие годы, тем более что заканчивается технологический ресурс у многих работающих ныне АЭС. Это послужит толчком к развитию электроядерных систем и, в первую очередь, реакторов-трансмутаторов.

Особенности электроядерных устройств, генераторов энергии, достаточно хорошо проработаны в многочисленных математических экспериментах с различными типами систем и тут трудно ожидать каких-либо неожиданностей. Хуже обстоит дело с трансмутацией радиоактивных отходов, где много неопределенностей, хотя бы уже потому, что в электроядерных реакторах образуется много изотопов, не встречающихся в природе. Особенности их вероятности взаимодействий с нейтронами известны весьма приближенно, в частности, в области энергий, меньших нескольких МэВ, где взаимодействия нейтронов с ядрами приобретают резонансный характер, изменяющийся при переходе от одного ядра к другому. Для выбора оптимальных режимов трансмутации потребуется еще большая экспериментальная и теоретическая работа.

Более подробно с проблемами электроядерной технологии можно ознакомиться в работах<sup>1,2</sup>, там же можно найти подробную библиографию.

<sup>1</sup> Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электроядерного метода // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1978. Т. 8. С. 871.

<sup>2</sup> Сисакян А.Н. и др. Электроядерная проблема на международном уровне // Международное сотрудничество. 1996. №. 3. С. 13.

