

Л. П. Зиновьев

«ОГРОМНАЯ МЕРА ОТВЕТСТВЕННОСТИ...»

(О запуске синхрофазотрона на 10 ГэВ и его модели)*

В конце 40-х годов Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР приступил к научной разработке проекта синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ. Главным научным руководителем был назначен Владимир Иосифович Векслер.

В распоряжение В. И. Векслера передавалась группа инженерно-технических работников, занимавшихся в Обнинске под руководством известного физика Александра Ильича Лейпунского подготовкой к разработке протонного ускорителя на 1–1,5 ГэВ. В эту группу входил и автор этих строк.

⟨...⟩

Мы с группой товарищей стояли у входа в малый ФИАН¹ на Миусах в ожидании Векслера, которого в то время в институте не было. Через некоторое время один из ожидавших воскликнул: «Векслер идет!» Я обернулся и увидел приближающегося к проходной ФИАНа человека небольшого роста, худощавого, в черной шляпе, в черном демисезонном пальто, в ботинках с галошами, на носу очки в тонкой золотой оправе, в руках непомерно большой портфель. Это был момент, когда я впервые увидел Векслера.

⟨...⟩

Для меня начался фиановский период работ, связанный с сооружением 10 ГэВ синхрофазотрона.

⟨...⟩

Грандиозность задачи, ее важность и огромную меру ответственности, которую взял на себя в то время Владимир Иосифович, трудно себе представить.

Синхрофазотрон, построенный и запущенный в 1957 г. на Волге около деревни Иваньково (ныне город Дубна), до 1960 г. был единственным ускорителем в мире, дающим возможность получать прото-

*Воспоминания о В. И. Векслере. М., 1987. С. 192–203 (с сокращениями).

¹Так называли площадку на 3-й Миусской ул., где находилось старое здание института. — *Ред.*

ны с энергией 10 ГэВ. На его сооружение ушло около 10 лет напряженного труда многих людей. Трудности создания дубненского синхрофазотрона в очень большой степени усугублялись тем, что в то время в нашей стране (так же как и за рубежом) отсутствовал опыт сооружения таких больших ускорительных установок. В процессе проектирования синхрофазотрона создавался ряд моделей для решения многих технических и физических вопросов, которые, естественно, не могли быть решены только на основе теоретических расчетов. Особое место в этом плане занимает действующая модель синхрофазотрона с условным названием «МКМ». Эта модель была сооружена в Москве на территории ФИАНа на Ленинском проспекте в специальном здании, которое было названо «складом № 2». Модель МКМ была запущена в 1953 г., она позволила ускорять протоны от 0,8 до 180 МэВ. В. И. Векслер придавал этой модели огромное значение, так как она позволяла исследовать основные вопросы, связанные с работой ускорителя в целом.

В частности, на МКМ был изучен вопрос ввода частиц в ускоритель от внешнего инжектора. Этот вопрос особо волновал Владимира Иосифовича, так как такой ввод частиц в ускоритель осуществлялся впервые. В начале 1951 г. Владимир Иосифович возложил на меня ответственность за все работы по МКМ, включая монтаж оборудования, наладку и комплексный запуск установки. Постепенно на «складе № 2» собрался небольшой, но хороший коллектив. Все работали увлеченно и с большим энтузиазмом, преодолевая многочисленные трудности, которые возникали на пути к цели.

(...)

В качестве инжектора на МКМ использовался электростатический генератор, работавший в непрерывном режиме, что давало большие преимущества для подбора начальных условий инжекции. Однако наш оптимизм не оправдался. Захвата в бетатронный режим сразу получить не удалось. Стали выяснять, в чем дело. Оказалось, что инжектор давал очень большую нестабильность энергии инжектируемых частиц от цикла к циклу (7–8 %), что исключало захват частиц.

Стали искать способ стабилизировать энергию инжектируемых протонов. Решение было найдено, но оно требовало больших работ по ремонту инжектора и, следовательно, задержки запуска МКМ. Однако работы по ремонту инжектора и создание новой аппаратуры и оборудования были закончены в рекордно короткий срок. Немалую помощь в этом оказал Владимир Иосифович, организовав быстрое изготовление необходимого оборудования в мастерских ФИАНа. После этого запуск МКМ был осуществлен сравнительно быстро, в 1953 г. Когда произошел запуск МКМ, Владимир Иосифович не замедлил прийти к

нам, чтобы порадоваться с нами успехам. Он был в чрезвычайно приподнятом настроении. Мне запомнилось, как он при этом сказал: «Ну все! Иваньковский синхрофазотрон работать будет». Вскоре после запуска МКМ появилось сообщение в газетах о запуске американского синхротрона со слабой фокусировкой — «Космотрона». В качестве инжектора на этом ускорителе использовался также электростатический генератор.

Велико было наше удивление, когда мы узнали, что американские специалисты выполнили систему стабилизации инжектора точно таким же способом, как это было сделано на МКМ.

После запуска МКМ на нем был проведен целый комплекс экспериментальных исследований различных процессов, связанных с работой ускорителя. Эти работы продолжались до марта 1955 г., после чего модель МКМ была переделана в электронный синхротрон.

(...)

Следует заметить, что МКМ сыграла немаловажную роль и для подготовки кадров к предстоящим работам на синхрофазотроне. В работах на МКМ принимали участие молодые специалисты, только что окончившие институты. Среди них С. К. Есин, К. П. Мызников, И. Б. Иссинский, Л. М. Попиненкова, Э. А. Мяз, Е. М. Кулакова, И. М. Баженова и др. Они получили на МКМ хорошую практику для работ на синхрофазотроне. Владимир Иосифович этому вопросу придавал большое значение, и при наборе молодых специалистов для работы на синхрофазотроне многих, хотя бы на короткое время, посылал на МКМ для ознакомления с работами на ускорителе.

Работая на МКМ, мне неоднократно доводилось ездить с Владимиром Иосифовичем в Иваньково на строительную площадку синхрофазотрона. Возвращаясь к тем далеким временам, каждый раз не перестаешь удивляться, как Владимир Иосифович мог выносить бесконечные поездки из Москвы в Иваньково и обратно. Обстоятельства, связанные с работой по организации сооружения ускорителя, и работа в Московском университете вынуждали Владимира Иосифовича к этим частым поездкам.

Во время этих поездок разговор в машине редко шел на отвлеченные темы, обычно на неисчерпаемые производственные. В теплые летние дни, возвращаясь из Москвы, Владимир Иосифович любил завернуть на канал и искупаться, вообще вечером на пляже в Дубне часто можно было встретить Владимира Иосифовича. Он хорошо плавал и обычно на дубненском пляже переплывал Волгу, чем вызывал большое неудовольствие работников спасательной службы.

5 апреля 1955 г. я вместе с семьей переехал в Дубну. В то время на строительной площадке заканчивались сборка электромагнита синхрофазотрона, монтаж и наладка других важных узлов ускорительного комплекса. Когда все эти работы подходили к концу, возникло чрезвычайно неприятное обстоятельство. На форинжекторе линейного ускорителя (ЛУ) начал пробиваться высоковольтный трансформатор (700 кВ), предназначенный для питания ускоряющей трубки форинжектора. Многократные ремонты, перемотка каскадов трансформатора не дали положительного результата. Сложилось тяжелое положение. Заканчивался монтаж всего оборудования ускорителя, а начать запуск его было нельзя, так как инжектор был в нерабочем состоянии.

⟨...⟩ сотрудники УФТИ² переделали начальную часть ускоряющей системы линейного ускорителя таким образом, чтобы снизить энергию инжектируемых из форинжектора протонов. Это позволило снизить напряжение высоковольтного трансформатора до 515 кВ. Такое напряжение трансформатор после ремонта надежно выдерживал.

Неприятности с трансформатором заставили серьезно подумать о будущем. НИИЭФА было предложено разработать высоковольтный импульсный трансформатор для форинжектора. Разработанный высоковольтный трансформатор ИТ-800 обеспечивал импульс напряжения до 800 кВ.

⟨...⟩

При наладке вакуумной системы синхрофазотрона мы столкнулись с довольно серьезной неприятностью. На синхрофазотроне вакуумная камера вследствие больших размеров и конструктивных особенностей представляет собой сложное устройство. Она состоит из двух отдельных камер. Высоковакуумная внутренняя часть камеры окружена форвакуумной. При наладке системы обнаружилось большое натекание из форвакуумной камеры в высоковакуумную, с которым 50 паромасляных вакуумных агрегатов ВА-5 не могли справиться, и давление в рабочем пространстве ускорителя существенно превышало проектное значение. Все попытки понизить давление в форкамере и уменьшить натекание в высоковакуумный объем не дали положительных результатов. Трудность заключалась в том, что обе камеры синхрофазотрона конструктивно органически связаны с магнитной системой синхрофазотрона. Поэтому устранение натекания невозможно выполнить без разборки магнита, а это существенно затягивало время пуска ускорителя. Но был другой путь — увеличение мощности вакуумной откачной системы.

²Украинский физико-технический институт (Харьков). — *Ред.-сост.*

К тому времени промышленность освоила выпуск более мощных вакуумных агрегатов ВА-8. Предложение увеличить мощность системы вакуумной откачки не встретило общей поддержки. Следует заметить, что конструкцию камеры ускорителя разрабатывал НИИЭФА, а систему вакуумной откачки — РАЛАН³, где директором был Александр Львович Минц, он же исполнял обязанности главного технолога сооружения синхрофазотрона. Минц категорически возражал против повышения мощности вакуумной системы. Он требовал доведения напекания в камеры синхрофазотрона до требований проекта. Попытка Владимира Иосифовича склонить Минца на переделку системы не имела успеха несмотря на то, что Векслер и Минц были друзьями. Чтобы решить этот вопрос, по инициативе Владимира Иосифовича была создана авторитетная комиссия под председательством А. И. Алиханова, которая вынесла решение — переделать систему откачки.

Надо отдать должное Владимиру Иосифовичу, который в сравнительно короткий срок сумел добиться приобретения нового вакуумного оборудования и его быстрого монтажа. Новая система откачки хотя сразу и не дала вакуума, близкого к проектному, но она обеспечила нормальные условия для ускорения протонов.

Наконец все было готово для комплексного запуска.

Владимир Иосифович издал распоряжение, по которому я был назначен ответственным за работы по запуску ускорителя.

В начале запуска много неприятностей доставляла система питания главной обмотки синхрофазотрона частыми внезапными отключениями цикла возбуждения, которые иногда сопровождались заметными разрушениями в системе игнитронных преобразователей.

Эти ненормальности в системе питания были тогда вполне закономерным явлением, так как они сопровождали период обкатки и наладки впервые созданного уникального устройства, каким являлась система питания синхрофазотрона. При циклическом возбуждении обмотки синхрофазотрона в системе питания циркулируют огромные потоки энергии. Достаточно сказать, что пиковая мощность питания обмотки магнита достигает ~ 140 000 кВт. При нарушениях в такой системе, приводящих к коротким замыканиям, возникают огромные токи короткого замыкания, пондеромоторные силы, от которых способны разрушиться огромные изоляторы и стальные конструкции, удерживающие их.

³Радиотехническая лаборатория Академии наук. — *Ред.-сост.*

Тщательное изучение каждой аварийной ситуации и создание специальных систем защиты, не предусмотренных проектом, постепенно сделали систему питания весьма надежной.

Работы по запуску ускорителя с протонным пучком начались в конце декабря 1956 г. Вначале мы исследовали прохождение пучка по инъекционному тракту до выхода пучка из инфлекторных пластин. С помощью магнитных и электростатических элементов инъекционной оптики формировали пучок при входе его в камеру ускорителя. Затем исследовали движение пучка в первом квадранте при возбуждении в нем постоянного магнитного поля. Завершался этот этап получением полного оборота пучка при возбуждении постоянного поля во всех четырех квадрантах.

Следующий этап был связан с изучением динамики пучка в рабочей области ускорителя при циклическом возбуждении магнитного поля.

Большая сложность этого и последующих этапов заключалась в том, что в то время мы располагали слишком скудной диагностической аппаратурой. Единственным средством наблюдения за пучком в камере синхрофазотрона были мишени с нанесенным на них люминофором. Вспышка света с мишени от попадания на нее протонов наблюдалась визуально через соответствующие окна и с помощью фотоумножителя на осциллографе. Кроме того, использовались мишени, расположенные равномерно по азимуту. Эти мишени дистанционно с пульта могли перемещаться в радиальном направлении и перехватывать протоны, попадавшие на мишень с люминофором. С помощью таких средств определяли траектории пучков. Изучая движение частиц в камере ускорителя при различных условиях инъекции пучка, мы обнаружили внезапное появление сильных искажений магнитного поля в рабочей области, которые вызывались, как выяснилось, появлением в магнитной системе ускорителя короткозамкнутых контуров, обусловленных нарушением электрической изоляции в различных конструктивных деталях. Потребовалось много труда и времени, пока исчезли условия появления таких короткозамкнутых контуров.

Изучение траекторий описанным выше способом было весьма кропотливым и непростым делом. Этот процесс отнимал много времени. Иногда на снятие интересующей траектории уходила целая смена, а то и больше. Поэтому наладка ускорителя в рабочем режиме продвигалась очень медленно. В то время режим работы был с 8 часов утра до 23–24 часов вечера. С утра каждого дня много времени уходило на подготовительные работы. Поэтому для ускорения дела в феврале 1957 г. мы перешли на непрерывную трехсменную работу.

В то тяжелое и напряженное для нас время Владимир Иосифович занимался подготовкой предстоящих физических экспериментов на будущем пучке ускоренных протонов. Кроме того, тогда же образовывался Объединенный институт ядерных исследований. Однако, несмотря на огромную занятость, Владимир Иосифович находил возможность и часто появлялся в ускорительном корпусе и интересовался, как у нас идут дела. Часто он приезжал в конце рабочего дня, узнавал о результатах, планах на ближайшие дни и часов в 11–12 ночи развозил нас на своей машине по домам. Владимир Иосифович старался быть в курсе событий, происходящих на ускорителе, поэтому часто приходилось вести с ним разговоры по телефону. Он много помогал нам, особенно в организационных делах. В начале февраля мы получили один оборот пучка при циклическом возбуждении магнитного поля.

Наступила самая ответственная задача — получение так называемого бетатронного режима. Режим, при котором протоны, введенные в камеру синхрофазотрона без включения ускоряющего поля, продолжают циркулировать после прекращения инъекции, принято называть квазибетатронным режимом или просто бетатронным.

Для получения бетатронного режима необходимо было включить ионный источник точно в тот момент, когда магнитное поле в зазоре ускорителя достигает величины, соответствующей энергии инжектируемых протонов. При этом напряжение на инфлекторной системе должно быть таким, чтобы протоны влетали в камеру ускорителя по касательной к мгновенной орбите, проходящей через инжектор.

Поиск бетатронного режима путем постепенного изменения ряда параметров долго не давал успеха. Было безрезультатно потрачено много времени. После этих неудач разработали метод⁴, который кратко заключался в следующем.

После поворотного магнита инжекционного тракта пучок диафрагмировался двумя узкими (1 мм) вертикальными щелями, находящимися на некотором расстоянии друг от друга. Щели располагались в ядре пучка. В результате такого диафрагмирования в камеру ускорителя выпускался пучок с очень малым угловым разбросом частиц и узким энергетическим спектром. По форме траектории одного оборота такого пучка можно было довольно точно настроить правильный угол влета частиц в ускоритель и момент привязки запуска источника к нужному

⁴Метод был разработан Л. П. Зиновьевым (см.: Зиновьев Л. П. Этапы большого пути // Дубна: Наука. Содружество. Прогресс. 1997. 12 марта). — *Ред.-сост.*

значению магнитного поля. Подготовка эксперимента по этой методике заняла несколько дней. Наконец все было кончено. Получена необходимая форма траектории пучка. Оставалось открыть заслонку, перекрывающую камеру ускорителя в конце 4-го квадранта. Это было 15 марта 1957 г. На наладочном пульте в зале ускорителя дежурство нес Сергей Константинович Есин, который в 16 часов сменил Кирилла Петровича Мызникова. На пульте в это время находился Валентин Афанасьевич Петухов, наш непосредственный шеф. Помню, как он подошел ко мне и задал вопрос: «Леонид Петрович, вот сейчас уберем заслонку, а циркуляции пучка не получим, что тогда?», на что я, показывая на миллиметровке траекторию, ответил вопросом на вопрос: «Валентин Афанасьевич! Вы видите траекторию частиц, впускаемых в камеру. Как, по-Вашему, такие частицы должны циркулировать или нет?» — «Должны». — «Ну а все-таки, вдруг не будут циркулировать?» На что я ему ответил: «Тогда нас завтра утром встретит солнце, которое взойдет с запада». Такие мои ответы, конечно, диктовались чувством уверенности за свой эксперимент. Но, несмотря на это, чувство волнения достигло предела. Хорошо помню, как перед открытием заслонки сердце билось так, что готово было выпрыгнуть. Наконец все было готово. Примерно в 17–18 часов подается команда: «Открыть заслонку!», дежурный вакуумщик пошел выполнять команду, а мы все устремили свои взоры на экран осциллографа. Он напряжения резало глаза. И вдруг, о радость! На экране осциллографа появился четкий сигнал от циркулирующих протонов. Кто-то крикнул «Ура!». Эксперимент удался! Немедленно удалили диафрагмирующие щели на пути инжектируемого пучка, и бетатронный импульс, который мы так долго с нетерпением добивались получить, сиял при каждом цикле ускорения на экране осциллографа. Начались поздравления. Звонили в город тем, кто ушел отдыхать после смены. Около пульта собралось много сотрудников от разных служб, дежуривших в сменах. Помню, какое сильное облегчающее чувство вызвал во мне первый бетатронный импульс.

Когда прошло короткое время радостей и поздравлений, начали включать ускоряющее высокочастотное напряжение. Довольно быстро настроили начальные условия высокочастотной системы и получили захват протонов в синхротронное ускорение, сначала на короткой «пачке»⁵ ускоряющей системы. Затем постепенным удлинением «пачки» достигли предельной энергии ускорения протонов, соответствующей максимальному магнитному полю.

⁵Имеется в виду цуг импульсов высокочастотного ускоряющего поля. — *Ред.*

В это время номинальный ток в обмотку электромагнита синхрофазотрона давать было нельзя. Это ограничение было наложено разработчиками системы питания для того, чтобы снизить степень разрушений при аварийных режимах, которые еще имели место в системе питания. Поэтому 15 марта максимальной энергии ускоренных протонов (10 ГэВ) получить не удалось.

Владимира Иосифовича при получении бетатронного режима в лаборатории не было. Он приехал поздно вечером и, конечно, был очень обрадован тому, что синхрофазотрон заработал. Ему нетерпелось получить предельную энергию на синхрофазотроне. Для этого он немедленно стал добиваться снятия ограничения на подачу в обмотку ускорителя номинального тока. 17 марта 1957 г. вечером в обмотку синхрофазотрона был дан ток в 12500 А и энергия ускоренных протонов была доведена до 10 ГэВ⁶. Владимир Иосифович прямо с пульта ускорителя доложил об этом Дмитрию Ивановичу Блохинцеву — первому директору Объединенного института, который не замедлил приехать к нам в ускорительный зал и горячо поздравил с успехом.

Синхрофазотрон заработал.

С того момента пучок ускоренных протонов стал использоваться для физических экспериментов, сначала для облучения фотоэмульсий, а затем и для облучения вторичными пучками физических установок.

В начальный период работы ускорителя много времени еще требовалось для получения оптимальных режимов работы основных устройств синхрофазотрона и оптимальной настройки оборудования. Надо заметить, что в то время было много и перерывов в работе из-за неисправностей, возникавших в различных узлах. Постепенно слабые места были ликвидированы.

Большие неприятности происходили из-за ненадежной работы инжектора — линейного ускорителя УФТИ. Поэтому мы предложили Владимиру Иосифовичу сделать самим в мастерских лаборатории новый линейный ускоритель с сеточной фокусировкой на энергию 10 МэВ.

Владимир Иосифович одобрил это предложение, и мы довольно быстро сделали такой инжектор (ЛУ-9), который был запущен в 1961 г.

В 1964 г. было решено построить более мощный современный линейный ускоритель на энергию протонов 20 МэВ — ЛУ-20 с трубками дрейфа, оснащенными магнитными линзами жесткой фокусировки. По-

⁶Здесь неточность: энергия пучка 10 ГэВ была получена 16 апреля. Физические эксперименты начались раньше, на более низких энергиях. — *Ред.-сост.*

пытка разместить заказ на разработку и изготовление ЛУ-20 в других организациях нам не удалась. Тогда решили соорудить такой ЛУ своими силами.

Владимиру Иосифовичу удалось разместить заказ на изготовление высокочастотных генераторов для возбуждения резонатора на заводе в Ленинграде; в центральных экспериментальных мастерских (ЦЭМ) ОИЯИ был изготовлен вакуумный кожух для ЛУ-20, все остальное изготовлялось в мастерских ЛВЭ.

Владимир Иосифович всячески поддерживал эту работу. Он помог приобрести высокоточные станки для изготовления трубок дрейфа. Особенно ценной для нас была его моральная поддержка. По независимым от нас причинам сооружение ЛУ-20 сильно затянулось. ЛУ-20 был запущен летом 1974 г. уже после смерти Владимира Иосифовича.

В первые годы работы синхрофазотрона большое беспокойство у Владимира Иосифовича и у нас тоже вызывала низкая интенсивность пучка ускоренных протонов. Владимир Иосифович этому вопросу уделял очень большое внимание. Исторически проблема увеличения интенсивности ускоренных протонов на синхрофазотроне решалась так: после ввода в действие инжектора ЛУ-9 в 1961 г. интенсивность протонного пучка возросла примерно в 10 раз ($7 \div 8 \cdot 10^{10}$ p/имп.). Ввод в действие ЛУ-20 в 1974 г. и создание группирователя и разгруппирователя на инжекторе, ввод в действие модуляции энергии инжектируемого пучка, улучшение характеристик магнитного поля в рабочей области синхрофазотрона и переход ускорения на вторую кратность дали увеличение интенсивности еще примерно в 20 раз. Рекордная интенсивность протонного пучка составила $4 \cdot 10^{12}$ протонов/имп. К большому сожалению, она была достигнута уже после смерти Владимира Иосифовича.

В течение прошедших 27 лет синхрофазотрон — детище В. И. Векслера — постоянно развивался и совершенствовался. На базе нашего синхрофазотрона в ЛВЭ ОИЯИ родилась релятивистская ядерная физика. (...) Мы делаем все возможное для того, чтобы наш синхрофазотрон хорошо работал, чтобы интерес к его пучкам возрастал. Этим мы поддерживаем добрую память о замечательном советском ученом В. И. Векслере. (...)