

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

16

Ю.А.Меркульев

**Миниатюрные критические массы
термоядерного горючего и делящихся
элементов**

**Москва
2010**

Аннотация

Целью данного научно-популярного обзора является подробное историческое описание развития работ над мишенями для инерциального термоядерного синтеза (ИТС). В большинстве научно-популярных работ о ИТС и даже чисто научных обзорах много внимания уделяется собственно концепции инерциального синтеза и огромным усилиям по сооружению импульсных источников энергии для термоядерного микровзрыва и обсуждению создания колоссальных установок масштаба термоядерного реактора. Сразу оговоримся, что «микровзрыв» является микро по сравнению со взрывом термоядерной бомбы, которая является неким крупным, но уже работающим прототипом. В данной статье речь пойдет о самих взрывающихся элементах микровзрыва – термоядерных мишенях, в основном, о лазерных мишенях. Понятие лазерная мишень часто используется при испытании боевого лазерного оружия. Мы же будем иметь в виду лишь лазерные термоядерные мишени, в некоторых случаях без термоядерного горючего, создаваемые для изучения отдельных плазменных процессов.

Первые принципиальные физические идеи, с которых начинает развиваться какое-либо научное направление, всегда просты и изящны, они вызывают восхищение. Их можно сравнить, например, со статуей из белого мрамора молодой древнегреческой богини. «Простое» предложение взять сферу из термоядерной взрывчатки и вложить в нее за очень короткое время большую энергию, чтобы сжав ее, добиться достижения критической массы. Реализация «простой» идеи требует каторжного творческого труда ученых и инженеров в течение 50 лет. Оказывается, что «эта богиня» должна иметь вес не больше и не меньше с точностью 0.1%, поверхность ее должна быть настолько гладкой, что сравнима только с хорошим зеркалом, и прочие еще около 20 условий. Мишень размером с булавочную головку является изделием с 20-30 характеристиками.

Работы по технологии изготовления мишеней практически не описывались в обзорах и книгах по ИТС. С одной стороны, потому что те кто писал обзоры не могли оценить трудоемкости достижений «фабрикаторов» мишеней и не представляли того, что изменение диаметра мишеней в 2 раза требовало изобретения новой технологии. С другой стороны, эти работы были частично засекречены, т.к. соприкасались с технологией оружия. Данный обзор, как историческое повествование работ над мишенями для ИТС, неизбежно выглядит отчасти как мемуары, в которых даны условия работ и, по возможности, упомянуты все специалисты, принимавшие участие в работах.

Миниатюрные критические массы термоядерного горючего и делящихся элементов.

Ю.А. Меркульев.

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева

Site: <http://www.lebedev.ru> e-mail: merkul@sci.lebedev.ru

1. Введение.

Научно-популярное изложение принципов инерциального термоядерного синтеза и его лазерного варианта в виде лекции О.Н. Крохина на канале «Культура» можно найти в интернете, в многочисленных статьях в научно-популярных журналах на протяжении последних 25-30 лет. Однако, история возникновения изящных и красивых идей термоядерного микровзрыва, атомного микровзрыва делящихся элементов и их комбинаций, а также рассказ о драматической гонке по созданию миниатюрных взрывных устройств – термоядерных мишеней - отсутствуют в научно-популярной литературе. Кроме того, в таком повествовании хотелось немного рассказать об авторах теоретических идей и о специалистах разных стран, внесших определяющий вклад в развитие технологии изготовления термоядерных мишеней, с большинством из которых мне посчастливилось встречаться и даже дружить. Поэтому можно рассматривать эту статью как мои краткие мемуары.

На заре инерциального термоядерного синтеза (лазерного синтеза) по решению Правительства СССР было категорически запрещено публиковать расчеты и эксперименты с термоядерными мишенями, дающими нейтронный выход эквивалентный энергии более 10^9 Дж, что заметно меньше взрыва 1 тонны химической взрывчатки. Хотя это почти на порядок меньше любой атомной бомбы, границу подвинули в меньшую сторону. Отсюда видно, что, во-первых, область военной технологии и мирного инерциального синтеза имеют общую идеологию, и, во-вторых, в больших масштабах эта идея уже проверена и работает в оружии.

Напомним несколько основных понятий ядерной физики для тех, кто забыл школьный курс. В основе атомной энергетики лежат простые законы физики. Будем считать при этом что энергия, которую несут получающиеся «легкие частицы» электроны, гамма-кванты, нейтрино и т.д., и кинетическая энергия «тяжелых частиц» - протонов, нейтронов, осколков деления ядра и ядер есть «тепловая» энергия ядерной реакции или ядерного распада.

1. Ядерные реакции с выделением энергии (реакции синтеза или деления ядер) выделяют «тепловую» энергию в соответствии с разностью масс ядер до и после реакции как Δmc^2 . Реакции с потерей энергии интересны лишь при изучении свойств ядер (ядерная физика) или при производстве изотопов, например, для медицинского применения.

2. В некоторых ядерных реакциях рождаются нейтроны – ядерные частицы, не имеющие заряда. Нейтроны теряют свою энергию при столкновениях с ядрами окружающего вещества или вступают в реакции с ядрами, образуя новые ядра или изотопы. Свободные (несвязанные в ядрах с протонами) нейтроны - нестабильные частицы, которые должны распасться на протон и электрон в течение 16 минут, но они так долго в веществах не живут, погибая в ядерных реакциях.

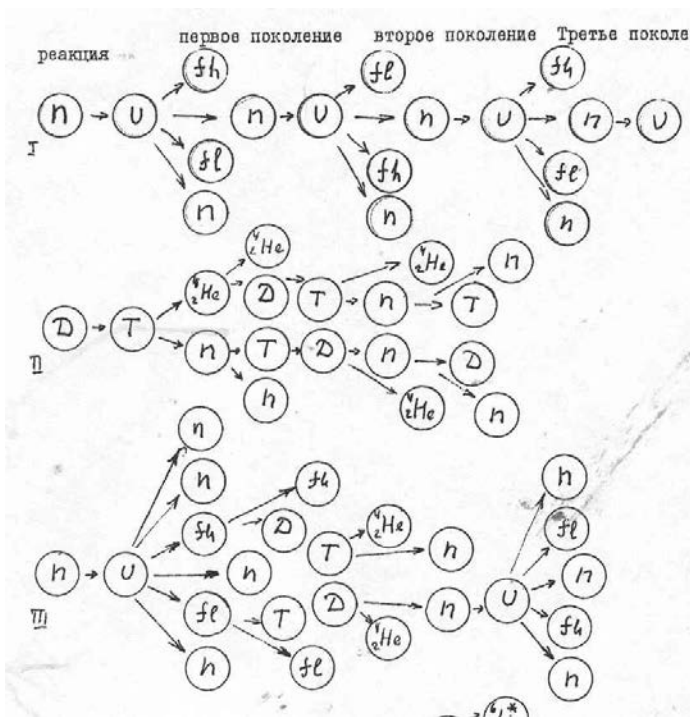


Рис. 1. Варианты цепных ядерных реакций: I – уран-235 и тепловые нейтроны, II - $D+T \rightarrow \alpha + n$, III – $14 \text{ MeV } n + U \rightarrow ff+ff + DT \rightarrow \alpha + n$ и т.д.

3. Среди ядерных реакций мы выделим отдельный класс – цепные ядерные реакции. Из них наиболее известной является реакция деления (см. рис. 1, I) с ядрами изотопов урана 235 (и 233) и плутония 239. Захватившее нейтрон ядро возбуждается и делится на два осколка (легкий и тяжелый фрагмент ядра) и несколько (чуть больше двух – в ряде реакций 2,а в некоторых 3) нейтронов. Из имеющегося у нас объема урана-235 нейтроны вылетают, но если объем достаточно большой, то хотя бы

один из нейтронов разрушит новое ядро, продолжив тем самым цепочку реакций. Минимальная масса объема урана, в котором цепная реакция не затухает, названа **критической массой** данного вида ядерного взрывчатого вещества.

4. В цепных реакциях синтеза $D+T=^4_2\text{He}^4 + n + E$ (17.5 МэВ) продолжение цепочки (см. рис. 1, II) возможно лишь за счет рассеяния альфа-частицы (ядро гелия - $^4_2\text{He}^4$) на атомных ядрах дейтерия или трития, которые, получив достаточную энергию, вызывают новую реакцию. Нейтрон с энергией 14.3 МэВ имеет пробег десятки см до

рассеяния на ядрах трития или дейтерия и покидает, как правило, малый объем термоядерного горючего. Поскольку в холодной смеси дейтерия и трития рассеяние и потеря энергии α -частицы происходит при столкновении с электронами, а вероятность продления цепочки реакций в десятки тысяч раз меньше единицы. Это еще до второй мировой войны привело известного физика Г. Бете к заключению о невозможности получения критической массы из DT-смеси [H. Bethe, *Physical Review*, (1938), V. 55, P. 434]. Однако, после создания атомной бомбы с ее высокой температурой внутри и ясного понимания того, что критическая масса существенно уменьшается при увеличении плотности вещества, ученые разных стран вернулись к идее самоподдерживающейся цепной реакции синтеза за счет энергии α -частицы.

Имеется целый ряд цепных ядерных реакций с другими легкими элементами, например, ядер дейтерия (см. рис. 1), но они требуют для своего протекания большей энергии (температуры), чем DT- реакция. Поэтому мы будем обсуждать лишь DT-смесь.

Ученые стран, занятые созданием атомного оружия (США и СССР), не могли в открытой печати опубликовать идеи получения критических масс термоядерного горючего из-за режима секретности. Ученый из Польши Михаил Гризинский (Michal Gryzinski) в 1958 году опубликовал в журнале *Physical Review* статью под названием «Цепные реакции синтеза – цепные реакции с заряженными частицами» (*Fusion Chain Reaction – Chain Reaction with Charged Particles*). В этой статье он учел торможение α -частицы на электронах при разных температурах и плотностях и показал, что незатухающие цепные реакции синтеза возможны при достижении «звездных» температур (для DT-смеси [1] 10^7K) или при больших сжатиях (для DT-смеси 10^4 при давлениях до 10^{11} атм.). Аннотация статьи кончается словами «Оценена критическая масса и в первом приближении показано, что она обратно пропорциональна квадрату плотности вещества». Сравнительно простое изложение расчетов и заманчивые перспективы получения при определенных условиях малой критической массы DT-смеси на уровне 10^{-2} грамма вызвали живой интерес и побудили всех ученых (как занятых военной тематикой, так и не занятых в закрытых работах) к обсуждению возможности проведения микровзрывов, в том числе и для получения электроэнергии.

Относительно недавно были рассекречены и опубликованы предложения Александра Сергеевича Козырева 1947 года [2] по сжатию и нагреву объема тяжелых изотопов водорода сферической сходящейся к центру ударной волной от взрыва химических взрывчатых веществ, а также экспериментальный рекорд $4 \cdot 10^{13}$ нейтронов при взрыве ВВ, полученный коллективом, который возглавлял А.С. Козырев во

ВНИИЭФ в г. Сарове (Арзамас-16) по публикации 1982 года. В идее А.С. Козырева уже предлагалось в 1947 году располагать концентрические сферические слои ВВ с разной скоростью ударной волны так, чтобы все волны достигали центра одновременно, умножая давление в объеме DT-смеси. Выход нейтронов в эксперименте получился большим, но в тоже время он свидетельствовал о том, что температура изотопов водорода была высокой, близкой к желаемой, но плотность DT-смеси была низкой и разжигания смеси α -частицами не произошло. Дальнейшего серьезного продолжения эти эксперименты не получили, т.к. стало ясно, что развитие гидродинамических неустойчивостей препятствует получению высокой плотности термоядерного горючего.

2. От уточнения параметров критической массы к тому, каким способом ее достичь.

Открытая публикация М. Гривинского [2] позволила ученым в разных странах начать обсуждение в открытой печати различных вариантов сжатия и нагрева плазмы, в том числе для получения электроэнергии от ядерных микровзрывов. Более строгие расчеты торможения α -частицы на электронах при разных плотностях DT-смеси и разных температурах показали, что плотность DT-смеси при температуре около 0°K , при которой возможно незатухающее развитие цепной реакции синтеза, составляет около 250 г/см^3 , т.е. в тысячу раз больше плотности твердой DT-смеси при атмосферном давлении (в 10 раз меньше, чем в [2]). Тем не менее, для получения такой плотности требовались давления в тысячи раз большие тех, которые достигались на уникальных специальных прессах.

На сравнительно простых ускорителях заряженных частиц уже лет 30 дейтоны (ядра дейтерия) разгонялись до энергии 300-400 кэВ с целью бомбардировки тонкой пленки циркония, насыщенного тритием и получали источник нейтронов с энергией $14.3 \div 14.5 \text{ МэВ}$ (ускорительный синтез). Первые 15 лет своей работы в ФИАН я участвовал в работах по нейтронной физике, используя импульсный генератор нейтронов.

Попытки получения чисто тепловой нагрев термоядерной плазмы в разрядах или установках с удержанием плазмы в магнитном поле интенсивно велись с начала 50х годов (наиболее известная такая установка – токомак). В начале этих работ всем казалось, что в разных типах установок удастся удержать частицы дейтерий-тритиевой плазмы с температурой около 10 кэВ и плотностью частиц $n=10^{12} \text{ 1/см}^3$ можно в

течение нескольких сотен секунд $\tau > 10^2$ с . Соотношение $n \cdot \tau > 10^{14}$ с/см³ называется критерием Лоуссона. Выполнить этот критерий пока не удавалось, но решительные шаги по строительству международной установки ITER вселяют надежды на успех.

Инерциальный термоядерный синтез (последовательность процессов при микровзрыве показана в схеме на рис. 2) стартовал на 20 лет позже магнитного и в

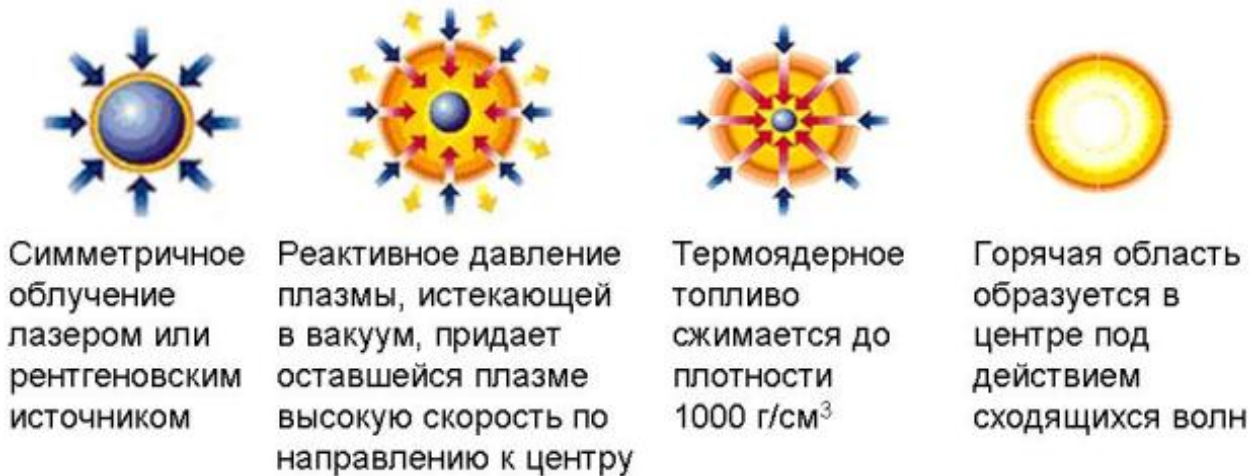


Рис. 2. Стадии микровзрыва



Рис. 3. Шуточное сравнение магнитного и инерциального термоядерного синтеза.

научном соревновании (как и в финансировании) всегда отставал. Соотношение проектов магнитного и инерциального синтеза проиллюстрировано в докладе д-р. Майклом Даном (Великобритания) на нашем рабочем совещании 2007 года (см. рис. 3 с сайта <http://mw2007ta.lebedev.ru/shedule>).



Рис. 4. О.Н. Крохин



Рис. 5. Н.Г. Басов

Все предложения в начале 60х годов о способах концентрации и передачи энергии в малый объем DT-смеси (несколько десятков кубических миллиметров) электронных и ионных пучков, света от только что созданных лазеров, рентгеновского излучения от различных импульсных источников нуждались в уточнении констант передачи

энергии от пучков к плотному веществу (плотной плазме) и техническом (инженерном) обеспечении. Только лазерный нагрев и сжатие плазмы, обсуждавшийся в ФИАН с 1962 года, (предложение опубликовано Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным см. рис. 4 и 5 в ЖЭТФ в 1964 году [3]) мог позволить вести начальные работы с требуемой плотностью потока энергии 10^{14} - 10^{15} Вт/см². На рисунках 4 и 5 приведены фотографии авторов этой идеи. К сожалению, у себя в архиве я не нашел фотографий 60х годов (я тогда занимался ядерной физикой). Поэтому я выбрал фотографию Н.Г. Басова в 1973 году (из архива А.И. Исакова).

Уникальные возможности лазерного излучения для получения импульсного высокого давления были высказаны в статье Г.А. Аскарьяна и Е.М. Мороза «Свето-реактивное давление» Письма в ЖЭТФ, (1962), Т. 43, С. 2319. Однако следующего шага к облучению сферы и к сверхсжатию плазмы авторы не сделали. В некоторых обзорах утверждается, что на эту возможность указывал А.Д. Сахаров на совещаниях в начале 60х годов, но документальных свидетельств этому (публикаций или ссылок на секретный отчет) нет. Во всем мире принято считать первым предложением лазерному термоядерному синтезу статью Н.Г. Басова и О.Н. Крохина в ЖЭТФ в 1964 году [3]. Обзор ранних зарубежных работ дан в монографии Дж. Дюдерштадт и Г. Мозес. Инерциальный термоядерный синтез. Пер. с англ. М. Энергоатомиздат, 1984, 304 с.

Простые оценки показывают, что для того, чтобы взорвать мишень диаметром 6 мм со слоем DT-смеси толщиной 250 мкм, надо обеспечить существование сжатой плазмы в течение $1 \text{нс} = 10^{-9}$ сек, вложив в нее за 10-20 нс 2 МДж при потоке $(3\div 6) \cdot 10^{14} \text{Вт/см}^2$.

Попытки ввести интенсивный пучок электронов в ограниченный объем вещества (плазмы) не удалось, т.к. возникал заряд мишени, препятствующий дальнейшей передаче энергии плазме. Для моделирования протонного и тяжело-ионного нагрева плазмы требовалось строительство колоссальных установок и повышение концентрации ионов в сгустке на два-три порядка. Создание **коротко** импульсных рентгеновских источников требовало повышения интенсивности и температуры равновесного рентгеновского излучения в полости и уходило в область технологии ядерного оружия. В качестве примера приведем схемы водородной и нейтронной бомбы из популярной статьи Ф. Винтерберга в журнале «Синтез» “Fusion” [4,5] (смотри рисунки 6 и 7). Зажигание термоядерного горючего происходит при нагреве и сжатии плазмы при сферическом облучении импульсом рентгеновского излучения, генерируемого другим взрывом и транспортируемого в основную камеру бомбы.

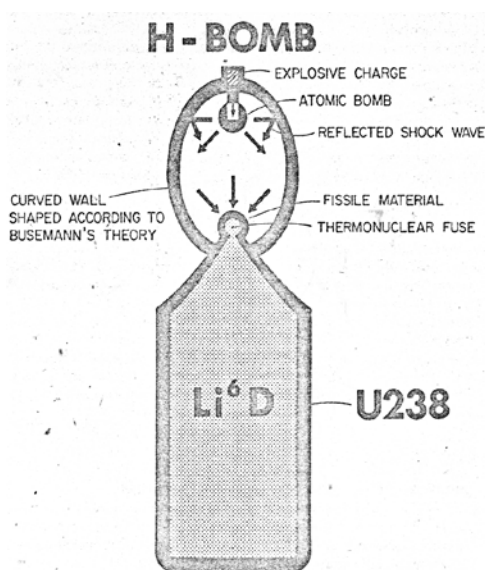


Рис. 6. Принцип работы водородной бомбы из статьи Ф. Винтерберга в журнале «Синтез» [4]

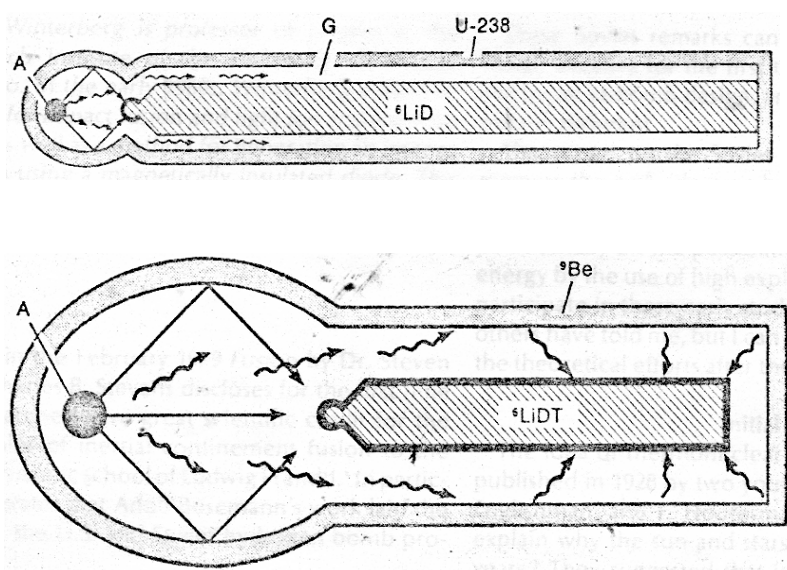


Рис. 7. Принцип автокаталитического горения водородной и нейтронной бомб из статьи Ф. Винтерберга в журнале «Синтез» [5]

В конце 60х и начале 70х годов развернулась гонка научных коллективов разных стран с целью создания лазеров с коротким по времени импульсом и получения первых термоядерных нейтронов в одномерной (плоской) геометрии (нагрев без сжатия горячей плазмы). Сейчас не помню, но, по-моему, первые нейтроны получили французы на плоской криогенной мишени из твердого дейтерия. Немного позже

нейтроны были получены в группе П.Г. Крюкова в коллективе Н.Г. Басова при действии короткого (доли наносекунды) лазерного импульса на мишень из дейтерида лития [6]. Мишень из LiD при установке в процессе в вакуумной камере взаимодействия окислялась с поверхности (обычно химически чистый LiD хранится в керосине), то экспериментаторы стреляли дважды. Один раз, чтобы удалить пленку окиси, а затем в чистый LiD. При первом выстреле наверняка возникал конус и второй выстрел происходил в профилированную мишень, которая, как показали в последствии работы И.К. Красюка из коллектива под руководством А.М. Прохорова, может давать более высокий нейтронный выход). Сформировалось два пути достижения сверхсжатия и зажигания DT-смеси: первое – прямой нагрев лазерным излучением сферической термоядерной мишени и сжатие плазмы за счет реактивного давления испаряющегося с



Рис. 8. Г.В. Склизков, 1972 год

поверхности сферы вещества, второе – преобразование лазерного излучение в мягкое рентгеновское излучение и уже затем воздействие рентгеновского излучения с мишенью (концепция не прямой термоядерной мишени). Совершенно очевидно, что исследования по этим направлениям проводились в двух типах лабораторий: с непрямыми мишенями в научных центрах, занятых бомбовой тематикой, а с прямыми мишенями в университетских и академических лабораториях.

Старт новой интенсивной международной гонки экспериментальных исследований по лазерному термоядерному синтезу можно отсчитывать от 1972 года. Но не потому, что в ФИАН в лаборатории Г.В. Склизкова (см. рис. 8) была запущена [7] в 1971 году первая лазерная установка «Кальмар» для сферического сжатия и нагрева плазмы (полная энергия в 9 каналах около 1 кДж, обычно работавшая на половине или трети энергии,). А потому, что на международной конференции в Монреале отец американской водородной бомбы Э. Тейлер сделал рекламу лазерному термоядерному синтезу, показав в простых оценках, что при сферическом сжатии в 10^4 раз, используя лазер с мощностью 1 кВт (1 кДж в импульсе) можно создать автомобильный двигатель. Автомобиль – это святое для американцев и они бросились догонять СССР (Н.Г. Басова с сотудниками). Хотя понятно, что при выходной мощности лазера 1 кВт и

коэффициенте умножения энергии в мишени 200, при выходе 200 кВт выход 14.3 МэВ нейтронов должен достигать 10^{17} нейтронов в секунду. Для защиты людей в таком автомобиле нужна водяная защита толщиной в 2-3 метра. Получается уже не автомобиль, а паровоз. Но американцы не любят ездить на поезде. При финансовой мощи американцам удалось догнать и перегнать лаборатории всех стран в течение нескольких лет (около 5), но за то, какая это была красивая гонка! Наши держались на равных сравнительно долго, потому что «голь на выдумки хитра».

Сейчас кажется, что лазер с энергией в импульсе около 100 Дж в течение 1 наносекунды (10^{-9} с) обычная рутинная лабораторная установка обычного университета за рубежом. Но 40 лет тому назад не было крупных лазерных элементов (кристаллов или стекол). Промышленное производство лазерных систем и ламп для оптической накачки (не говоря уже о полупроводниковых лазерах для оптической накачки неодимовых лазеров) сравнительно быстро развернулось во многом благодаря гонке престижа в лазерном термоядерном синтезе и, конечно, попыток создания лазеров для военного применения.

До микрокритической массы 10 мг DT-смеси было еще очень далеко, строившиеся и проектируемые установки для исследования по инерциальному термоядерному синтезу (импульсные лазерные, Z-пинчевые или тяжело-ионные ускорительные установки) поражали своими масштабами. Не сразу укладывается в голове, что все эти огромные сооружения (“drivers”) нацелены на объем термоядерного горючего размером с булавочную головку – термоядерную мишень.

Возвращаясь к колоссальным выделениям ядерной энергии, напомним, что в атомной бомбе используется кусок урана-235 размером чуть размером с двухлитровую банку (причем успевает сгореть всего несколько процентов), а в водородной бомбе объем дейтерида лития-6 даже меньше теннисного мяча, но выгорает более 30% горючего.

При этом у любопытного читателя возникает вопрос: «А почему атомные реакторы такие большие (сотни кубометров воды с установленными в ней урановыми стержнями (с невысоким содержанием урана-235 или как в Индии урана 233)»?». В атомных реакторах из всей загрузки в несколько тонн урана при 1000 МВт мощности за **10 лет(!)** эксплуатации выгорит около 400 грамм урана-235. Время выгорания урана увеличено почти в 10^{14} раз по сравнению со временем выгорания урана в бомбе, поэтому энергию деления легче превратить в тепло и электроэнергию.



Рис. 9. Фотография участников конференции в г. Снежинск в 2001 году в музее атомного оружия.

На рисунке 9 показана фотография, сделанная в музее ядерного оружия в г. Снежинск (Челябинск-70), группа участников конференции на фоне макетов большой водородной бомбы и малого атомного снаряда. Неспециалистов поражает большая бомба, но заметим, что все, что больше волейбольного мяча, это химическая

взрывчатка, требуемая для сжатия и нагрева ядерных материалов (“drivers”). Когда в заряд вложено много энергии, то горят (в ядерном смысле) все материалы. Специалистов удивляет малая бомба, т.к. для инициирования ядерного взрыва (при сжатии) используется сравнительно немного химической взрывчатки. Это уже искусство создателей! Именно поэтому последние испытания атомного оружия, проведенные французами на атоллах в Тихом океане, выполнялись с бомбами на уровне нескольких десятков тысяч тонн ВВ (для атомных бомб это мало!). Гонка в достижении условий микровзрыва в инерциальном термоядерном синтезе научных центров разных стран связана с достижением цели при минимальной энергии driver.

Но начальная фаза исследований при малых энергиях лазерных установок в 70х-80х годах прошлого века была очень важна, т.к. давала информацию об эффективности вложения лазерной энергии в плазму (коэффициент поглощения), о теплопереносе (коэффициент электронной теплопроводности) и о гидродинамических процессах при сжатии и нагреве термоядерных веществ. Характерным примером ошибки в оценке пригодности различных лазеров для ЛТС. В 70х годах во всех странах с увлечением работали над созданием мощных CO₂ лазеров, обладавшим высоким кпд при разных формах накачки. Н.Г. Басов (как впрочем и специалисты Лос-Аламоской лаборатории США) был ярким сторонником применения CO₂ лазера для ЛТС. Длинноволновое излучение CO₂ лазера было неэффективно при нагреве мишеней. Электронная плотность плазмы, называемая критической N_{cr}, при которой поглощается лазерное излучение обратно пропорциональна квадрату длины волны $N_{cr} = A/\lambda^2$. Если для Nd лазера N_{cr} приблизительно в тысячу раз меньше плотности электронов в твердом теле,

то для CO_2 лазера N_{cr} в десять тысяч раз меньше. Получается, что расстояние от мишени, на котором поглощается излучение CO_2 лазера, в сто раз больше того же расстояния для Nd лазера. Получается, что энергия лазера теряется в пространстве, не доходя до мишени. С этим не сразу смирились некоторые физики. Конверсия излучения CO_2 лазера в рентгеновское излучение была слабой и короткий импульс



Рис. 10. В.В. Коробкин, 1996 г.

лазерного излучения не получался.

Были обнаружены такие удивительные явления как явление самофокусировки лазерного излучения в различных средах (открытое Г.А. Аскарьяном), более низкая по сравнению с классической электронная теплопроводность, уплотнение плазмы в зоне поглощения лазерного излучения, генерация сверхсильных магнитных полей на неоднородностях поверхности абляции, исследованная В.В. Коробкиным (см. рис. 10) из коллектива, руководимого П.П. Пашиным, и пр.



Рис. 11. П.П. Пашин, 1972 г.

Интересный вариант лазерного эксперимента был предложен П.П. Пашиным, А.М. Прохоровым и др (см. рис. 11) с термоядерным горючим без мишени, но с самоформированием в газообразной DT-смеси или дейтерии сферической оболочки – ударной волны за счет первого короткого интенсивного импульса лазерного излучения. Сама идея отказа от мишени (не нужна каторжная работа лабораторий мишеней) изящна, но, снимая требования к конструкции мишени, накладывает очень жесткие требования на лазер. Для реализации этой идеи требуется короткий интенсивный лазерный импульс для основного взаимодействия, желательно с короткой длиной волны. Обычно работа движется в обратном направлении, то, что не удается сделать с лазером, приводит к новым требованиям к конструкции мишеней. Например, не удастся сделать короткий импульс лазера, тогда надо сделать мишень тонкую большего диаметра и т.д.

3. Микрокритические массы делящихся веществ и конструкции, совмещающие синтез и деление. Идеи получения трансурановых элементов.

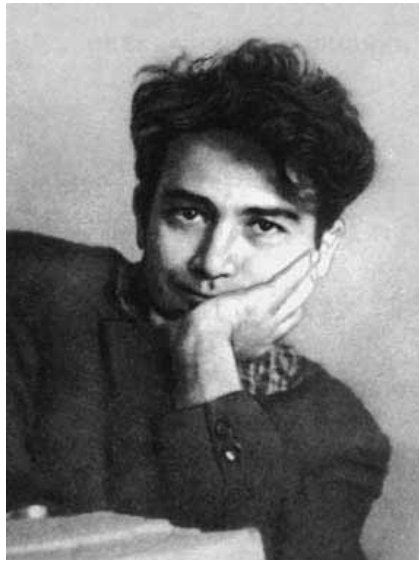


Рис. 12. Г.А. Аскар'ян

Широкое распространение теоретических и экспериментальных работ лазерному нагреву и сжатию термоядерной плазмы, дающей первые нейтроны, привело к генерации идей по лазерному получению микровзрывов делящихся веществ. Гурген Ашотович Аскар'ян (см. рис. 12) в 1971 году высказал идею получения микрокритических масс делящихся веществ. Рекомендую прочитать статью Б.М. Болотовского об Гургене Ашотовиче в книге, посвященной памяти Г.А. Аскар'яна [8]. Публикация идеи Г.А. Аскар'яна отложилась до 1973 года из-за вопросов секретности. Я, как и ряд

других сотрудников ФИАН, высказывали сомнение Гургену Ашотовичу в возможности микровзрыва такой критмассы, нуждавшейся в первоначальном большом количестве нейтронов.

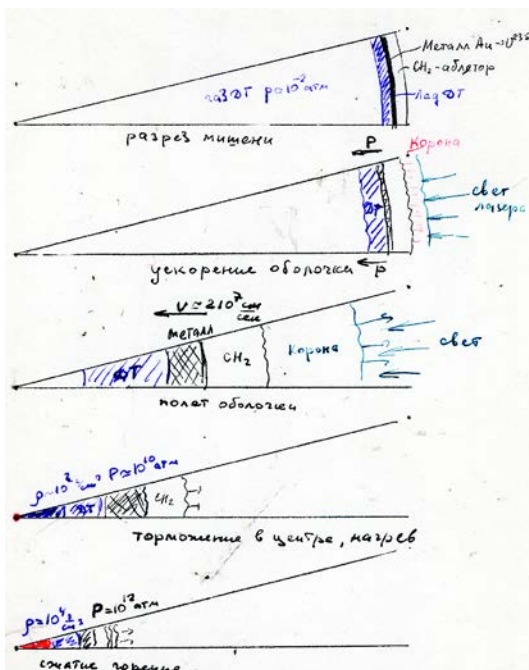


Рис. 13. Стадии нагрева и сжатия оболочечных мишеней со слоем урана.

В 70х годах появилось много предложений по применению термоядерных мишеней - оболочек из делящихся веществ с дейтерий-тритиевой смесью внутри, в которых термоядерные нейтроны вызывали деление урана. При этом энерговыделение урана существенно увеличивало эффективность всей конструкции в целом по сравнению с инертной оболочкой. Для тех специалистов, которые по статьям в популярной литературе интересовались устройством ядерного оружия, такие конструкции и преимущества их использования казались вполне естественными. Из легко доступных материалов рекомендую книгу

«Лев и атом» с сокращенной лекцией Л.П. Феоктистова о устройстве атомных бомб [9].

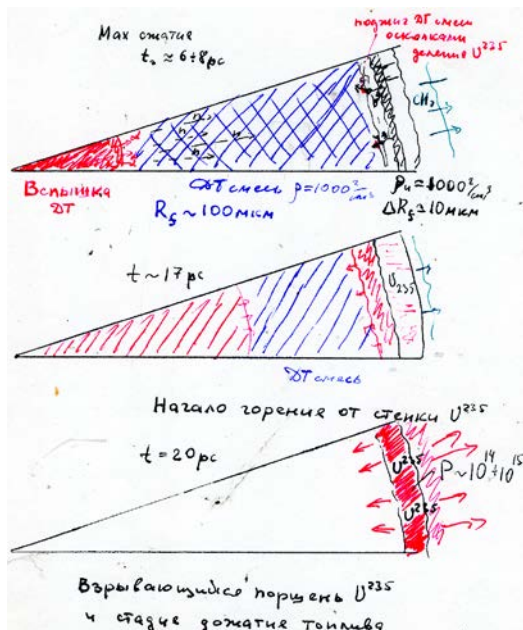


Рис. 14. Горение DT-смеси при участии урана 235 в оболочке

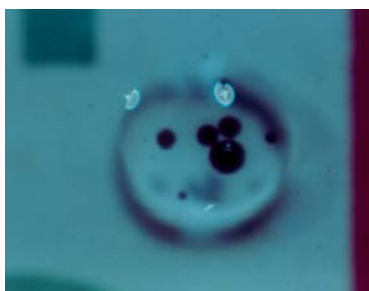


Рис. 15. Микрофотография оболочек из уранового стекла, плавающих в капле спирта.

«взрывающегося поршня» в первых экспериментах по получению термоядерных нейтронов в сферических тонкостенных стеклянных оболочках, но это уже «ядренный взрывающийся поршень». К сожалению, сразу опубликовать эту идею не дали, и она была упомянута лишь в нашем обзоре в 1989 году [10] и подробнее в 1992 г. в [11]. Но в 70х годах я был увлечен этой идеей и даже разработал технологию оболочек из уранового стекла (см. рис. 15). Стекло, содержащее окись урана в количестве 4-5% вес., имеет черный цвет. Из такого стекла делались штофы (квадратные бутылки) для водки (царская монополия) до 1917 года. Оболочки-мишени с добавками (до 1%) урана использовались на лазерных установках «Кальмар» и «Дельфин» в ФИАН, но в силу того, что в то время мишени заполнялись лишь дейтерием и никакого влияния на выход нейтронов примеси оказать не могли.

В последние 10 лет вернулись к расчету динамики и эффективности термоядерных мишеней со слоем урана-235 в проектах по тяжело-ионному термоядерному синтезу. В ФИАН группа теоретиков во главе В.Б. Розановым, ведущая расчеты совместно с группой Николая Васильевича Змитренко из Института прикладной математики, в большинстве расчетов не применяла программу расчета динамики горения, а лишь по $\langle \rho R \rangle$ среднему произведению плотности DT на радиус плазмы и по температуре

Я был также увлечен задачей повышения эффективности лазерных термоядерных мишеней за счет применения оболочек, содержащих делящееся вещество. Но в отличие от других авторов я обратил в 1976 году внимание на то, что в момент генерации первых нейтронов в слое урана начинает резко подниматься температура, а, следовательно, и давление (см. рис. 13 и 14). Это приводит к появлению новой ударной волны как внутрь DT-смеси (дополнительное сжатие и удержание), так и наружу.

Это режим напоминает режим «взрывающегося поршня» в первых экспериментах по получению термоядерных нейтронов в сферических тонкостенных стеклянных оболочках, но это уже «ядренный взрывающийся поршень». К сожалению, сразу опубликовать эту идею не дали, и она была упомянута лишь в нашем обзоре в 1989 году [10] и подробнее в 1992 г. в [11]. Но в 70х годах я был увлечен этой идеей и даже разработал технологию оболочек из уранового стекла (см. рис. 15). Стекло, содержащее окись урана в количестве 4-5% вес., имеет черный цвет. Из такого

плазмы оценивала нейтронный выход. Детальными расчетами горения в сложной системе горючего занимались теоретики ИТЭФ (М.М. Баско), а во ВИИИЭФ группа во



Рис. 16. Г.В. Долголева, 2005 г.

главе Г.В. Долголевой (см. рис. 16). Усиление энергии в мишени со слоем урана по сравнению с такой же мишенью со слое золота возрастает в десятки раз, уран может доходить до критического состояния.

В конце 90х годов я упросил Н.В. Змитренко и С.Ю. Гуськова поставить расчет горения мишени со слоем урана, но коллеги выбрали размеры мишени не годные. Уран уходил в корону и из-за низкой плотности не мог участвовать в выделении энергии. Выполнено было всего 2 расчета, на этом все и закончилось. По моим простым оценкам основной выигрыш возможен лишь в том случае, когда урановый слой, находящийся на границе с DT-слоем сжимается очень сильно [11].

Своими предложениями по динамике горения двойной оболочки из урана-235 и DT-смеси мне не удалось поделиться с сотрудниками других институтов и передать им алгоритм расчета.

Есть в этом предложении изъян, оболочка должна состоять из слоя аблятора (например, пластика) и слоя уран-235. На границе этих слоев должны развиваться гидродинамические неустойчивости. Но в последние годы мы начали разработку технологии изготовления слоев с постепенно нарастающей плотностью [12] и слоев тяжелых металлов пониженной плотности. Наверняка можно было уменьшить влияние этого недостатка. Можно было создать слои полимера и малоплотного полимера с наночастицами металла, который затем превращается в дейтерид-тритид урана.

Гонку престижа по достижению положительного энергетического выхода можно сравнить с азартной игрой в карты. Преферанс. Желание руководителей программ быстро выиграть, играя на «бомбе» в темную, противоречит методике науке, в которой добиваются успеха те, во всех партиях набирает очки на вистах.

4. Первые эксперименты с лазерными термоядерными оболочечными мишенями и уточнение требований к параметрам мишеней.



Рис. 17. В. И. Куликов
1973г.



Рис. 18. А.И.
Никитенко 1974 г.

В начале 70х годов мы с Вячеславом Ивановичем Куликовым (см. рис. 17) и Андреем Ивановичем Никитенко (см. рис. 18) с ассистентами исследовали процесс диффузии «тепловых» нейтронов в жидком и твердом водороде, используя импульсный нейтронный генератор, дающий около 10^{10} нейтронов в секунду при частоте около 1000 герц. Результаты оказывались трудно объяснимыми, пока мы не поняли, что нейтронный спектр, который должен иметь при равновесии со средой вид максвелловского распределения с температурой 20.4К (или 14К для твердого водорода), на самом деле не является максвелловским. Жидкий водород, полученный при быстром охлаждении от 300К комнатной температуры, сохраняет соотношение орто- и пара-молекул 3:1. Протон – ядро атома водорода имеет спин $\frac{1}{2}$ и поэтому, создавая молекулу водорода из двух атомов, образует при комнатной температуре 4 молекулы, из которых по законам статистики одна молекула пара с суммарным спином 0, и три молекулы орто со спином 1. При низких криогенных температурах равновесным является только пара-состояние.

Поэтому быстро охлажденный жидкий водород находится в метастабильном (термодинамически неравновесном) состоянии, переходя медленно в течение сотен часов в пара-состояние. При рассеянии нейтронов с переворотом спина на орто-молекуле водорода она переходит в пара-положение, выделяя заметную энергию (почти 10кТ). Поэтому спектр нейтронов в жидком водороде, содержащем заметное количество орто-фазы, состоит из двух групп (максвелловское распределение с температурой 20К и горячей группы нейтронов после рассеяния с переворотом спина, а также переходной области между ними). Это объяснение сразу облегчило объяснение получаемых нейтронных констант.

Надо сказать, что для получения твердого водорода мы из высокого цилиндрического сосуда быстро откачивали жидкий водород, получая шугу (мелкокристаллическую смесь твердого и жидкого водорода). Затем покрытым

кадмием поршнем с искривленными каналами отжимали жидкость, а для оценки количества жидкого водорода над поршнем применяли датчики уровня из платиновой проволоки с диаметром около 1 микрона. Этим измерениям мешали капли водорода, висевшие на проволоке (см. рис. 19)



Рис. 19. Микрофотография висящих капель водорода

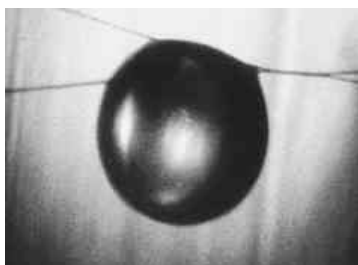


Рис. 20. Микрофотография капли водорода на микронных платиновых нитях

После доклада Э. Тейлера и докладов американских теоретиков, показавших в расчетах, что, если взять твердый шарик из ДТ-смеси диаметром в несколько миллиметров, и подать на него лазерное излучение, интенсивность которого растет во времени по определенному закону, то можно достичь критического состояния с мощным энерговыделением, Н.Г. Басов начал искать тех, кто мог бы это сделать. Мы рассказали о такой возможности Н.Г. Басову, и показали в криостате с оптическими окнами О.Н. Крохину как можно сделать шарики из твердого водорода (в том числе, тяжелого, см. рис. 20).

Сразу после публикации материалов конференции в Монреале 1972 года появилось много возражений против предложенной американцами схемы. Требовалась высокая точность профилирования лазерного импульса (решение было неустойчиво по отношению к возмущениям в форме импульса). Кроме того, в конечной стадии импульса требуемая интенсивность лазерного излучения больше 10^{16} Вт/см², что порождает возникновение

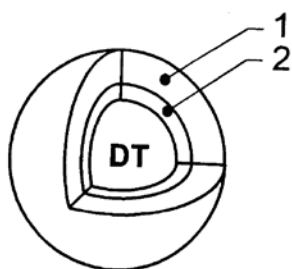


Рис. 21. Схема мишени – оболочки: 1- полимер, ДТ-твердый слой

быстрых электронов и приводит к ненужному нагреву сжимаемого объема ДТ-плазмы. Почти сразу начала обсуждаться другая конструкция термоядерной мишени (см. рис. 21) – сферическая оболочка из легких веществ, заполненная ДТ-смесью (сравнение режимов облучения сплошной сферы и оболочки дано на рис. 22). И опять мы выступили со своим предложением, не проводя детальный поиск. Мы работали с жидким азотом и для простых сосудов

для него использовали вспененный полистирол, иногда вспенивая крупные гранулы полистирола в определенной форме.

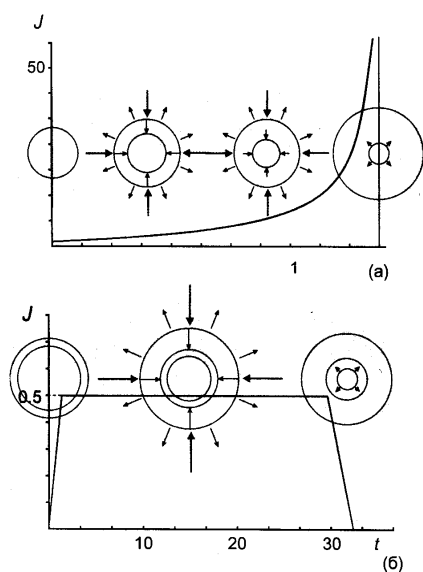


Рис. 22. Конструкции мишеней и требуемые условия облучения : а – профилированный импульс для мишени в виде сплошного шара, б – простой импульс для оболочки - мишени

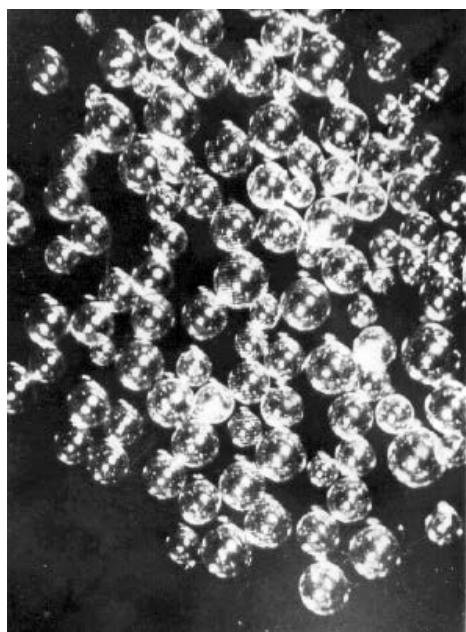


Рис. 23. Микрофотография первых оболочек из полистирола

Мы предположили, что если вспенить мелкую гранулу, то может образоваться жидкий пузырек из полимера, который при охлаждении даст требуемую оболочку.

Чтобы добыть исходных гранул (а они должны были быть диаметром 0.05-0.15 мм, в отличие от тех из которых мы делали сосуды для жидкого азота) я съездил на завод «Строитель» под Москвой и из «пустых» мешков для гранул, используемых при производстве строительных теплоизоляционных плит, выбил мелкую пыль в количестве около 200 грамм. Для завода, производящего более 60 тонн в день, эта пыль была не нужна. Вернувшись в тот же день в ФИАН, я при участии А.И. Никитенко в кипятке от чайника вспенил порошок. Затем я сел к микроскопу и до поздней ночи отбирал наиболее красивые образцы, захватив часть из них, чтобы утром показать начальству (см. рис. 23).

Утром следующего дня я с образцами оказался у Н.Г. Басова, который принимал М.С. Велисову из ГИПХ г. Ленинграда (Государственный институт прикладной химии). В СССР М.С. Велисова была руководителем разработок по капсулированию горючих (сухое горючее) и пожаротушающих жидких смесей. Образцы из Ленинграда и наши образцы положили рядом под микроскопом, и Н.Г. Басов, посмотрев на них, сказал: «Эти белые (прозрачные) мне нравятся». А.И. Исаков заявил: «Это сделано у нас». Надо сказать, что капсулы из ГИПХ были

заполнены подкрашенной (зеленой или желтоватой) жидкостью и имели заметную асимметрию.

С этого момента начались разговоры о том, что моей научной группе надо заканчивать нейтронную тематику и сосредоточиться на технологии изготовления лазерных термоядерных мишеней. Для меня, к тому времени к.ф.-м.н. по специальности ядерная физика, и моих сотрудников это означало решительно сменить специальность. Отчасти на мое решение повлиял разговор с Г.К. Флеровым, когда он передавал мне статьи американских ученых о получении трансурановых элементов в лазерных экспериментах с большими мишенями, покрытыми слоем легкого водорода (замедлителя 14 МэВ нейтронов). Чуть позже Г.А. Аскарьян опубликовал свои идеи о нейтронных и нейтринных экспериментах с лазерными термоядерными мишенями. Я посетовал Г.К. Флерову, что до таких нейтронных экспериментов, по мнению Н.Г. Басова, еще лет 10-15 (я только позже узнал, что уже существовало правило плановое время нужно умножить на π , а в нашей стране на π^2). На что Г.К. Флеров заметил, что



все ответственные эксперименты готовятся долго, но если хочешь в них участвовать, надо начинать их на старте. Он сказал: «Это как в шахматах, надо активно работать в дебюте». Мы перешли на новую тематику и даже воспроизвели в макете мишень с внешним слоем из водорода (см. рис. 24) для опытов с получением трансурановых элементов.

Рис. 24. Микрофотография оболочки – мишени



Рис. 25. А.А. Сулимова и С.А. Цыганов в годы учебы в МИФИ (фотография сделана автором статьи в 1954 году).

Перед принятием окончательного решения о смене тематики я пригласил двух моих друзей Алексея Сулимова и Сергея Цыганова (см. рис. 25), с которыми начинал учебу в МИФИ в группе при кафедре «Физика взрыва» (руководимой Н.Н. Семеновым). После второго курса я подал прошение ректору и был переведен на факультет

экспериментальной и теоретической физики, а мои друзья, закончив институт, пошли работать по специальности в Институт химической физики РАН.

Я рассказал о том, что теоретики, ведущие расчеты термоядерных микровзрывов при лазерном нагреве сферических мишеней, утверждают, что при сжатии в 10^4 раз можно получить микровзрыв мишеней, изготовленных с точностью несколько процентов. Они также утверждают, что развитие неустойчивости при быстром сжатии лазерной мишени происходит медленнее, чем при химическом взрыве ВВ. Мои друзья – специалисты возражали, утверждая, что законы природы при химическом взрыве и при сферическом сжатии лазерной плазмы одинаковы. И, если очень повезет, то сжатие 10^3 от твердого тела получится, и микровзрыв, если возможен, то осуществится на уровне вложенной энергии в мишень около 10 МДж. Через почти 40 лет работ можно сказать, что мои друзья оказались совершенно правы (провидцы или специалисты!).

В 1974 году в фирме KMS-Fusion (США) на двухпучковой лазерной установке (около 80 Дж в обоих каналах) с применением эллиптических зеркал для выравнивания интенсивности лазерного излучения на поверхности стеклянной оболочки – мишени,

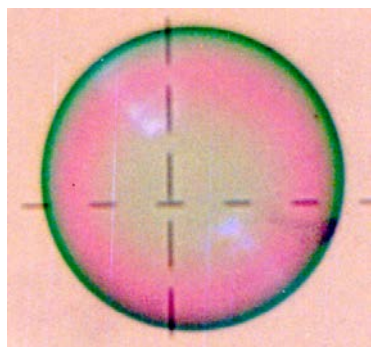


Рис. 26. Микрофотография стеклянной мишени с диаметром около 350 мкм и толщиной стенки 0.5 мкм.



Рис. 27. А.И. Исаков, 1974 год

заполненной газообразной DT-смесью, были получены первые нейтроны из сферы. Стеклянная оболочка – glass microballon (GMB), выбиралась по специальной технологии одна из 10 миллионов штук GMB. Фотография такой мишени на человеческом волосе в три раза более толстом (диаметр мишени около 70 мкм и толщина стенки около 0.6 мкм, так что она дает интерференционное цветное свечение см. рис. 26) с надписью «**Микроводородная бомба**» была выставлена в 1974 году на стенде на стене американского посольства в Москве. Конечно, это журналисты написали для красного словца. К бомбе это практически никакого отношения не имеет. В декабре 1974 на международной конференции по физике плазмы в Японии О.Н. Крохин и А.И. Исаков (заведующий нейтронно-физической лаборатории ФИАН отделения «В», в которой работала наша группа мишеней, см. рис. 27) демонстрировали фотографии мишеней – оболочек из полистирола. Авторитет нашей страны мы поддержали.

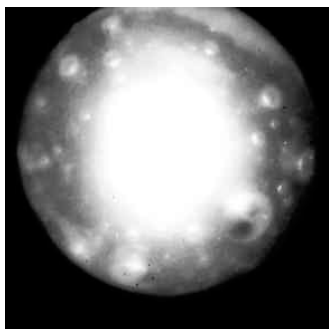


Рис. 28. Микрофотография оболочки из полистирола ГИПХ.

М.С. Велисова как настоящий ученый, не удовлетворенный первой демонстрацией образцов у Н.Г. Басова, выполнила с коллегами разработку метода изготовления оболочек из полистирола методом микрокапсулирования, продемонстрировав их Н.Г. Басову в 1977 году. Оболочки (правда, толстостенные) обладали хорошей сферичностью, но содержали в стенках пузырьки (см. рис. 28). Эта беда преследовала химиков всех стран, пытавшихся изготовить мишени из полистирола методом

микрокапсулирования. Долгие технологические поиски привели к тому, что пузырьки стали иметь субмикронный размер, но количество их было значительно. Только в 90х годах М. Такаги (см. рис. 29) из Японии сумел сделать оболочки без пузырьков, поэтому и был приглашен на работу в Ливерморскую национальную лабораторию США.



Рис. 29. М. Такаги

Надо сказать, что первые нейтроны при сферическом лазерном облучении мишеней в научных центрах (исключая KMS-Fusion), которые потом долгие годы соревновались в научных достижениях, такие как Лаборатория лазерной энергетики Рочестерского университета США с установкой «Зета»

(руководитель Марк Любин) и лаборатория лазерной плазмы ФИАН с установками «Кальмар» и «Дельфин» (руководитель Глеб Владимирович Склизков) получали на сплошных сферических мишенях из дейтерированного



Рис. 30. Ю.А. Михайлов.

полиэтилена $(CD_2)_n$. При этом американцы обнаружили, что если сделать шарики из пористого $(CD_2)_n$ полиэтилена с плотностью 0.2 г/см³, то нейтронный выход возрастет в несколько раз. В ФИАН капли - шарики из $(CD_2)_n$ полиэтилена, сплавляя порошок, произведенный в ГИПХ, делал Юрий Анатольевич Михайлов (см. фотографию на рис. 30). Поскольку под мощным микроскопом такие шарики не фотографировались, то очень вероятно, что в них были микропузырьки, способствующие получению DD-нейтронов. Кроме того, в таких экспериментах были зафиксированы и DT-нейтроны, как продолжение цепочки термоядерных реакций [13].

В первые годы нашей работы над технологией изготовления мишеней мы пытались сформулировать некоторые общие принципы формирования оболочек правильной сферической формы и постоянной толщины во всех угловых направлениях. Мы решили, что оболочки должны быть свободны, как мыльные пузыри. И, если нужен нагрев и охлаждение, то надо, чтобы это происходило в полете. Никакой механической обработке оболочки не должны подвергаться. Был сформулирован лозунг «Рука человека не должна касаться мишени!».

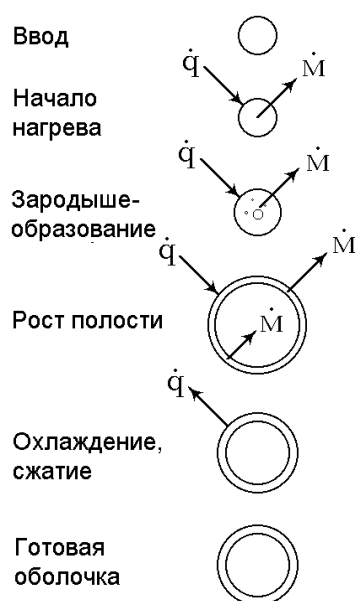


Рис. 31. Последовательность стадий формирования полимерных оболочек [22].

Позднее, скорее для красного словца, мы назвали формирование оболочек при падении в вертикальной трубчатой печи с разреженной атмосферой инертных газов «формированием в условиях кратковременной невесомости». Конечно, при движении исходной гранулы и особенно вспененной оболочки в печи падения имеет место торможение в газе, от которого, кстати, отказаться нельзя, т.к. только в газе возможно быстрое охлаждение (закаливание) оболочки (смотри схему на рис. 31).

Позднее, когда в космическом корабле (в невесомости) попытались изготовить металлические оболочки, вспенивая гранулы алюминия с газообразователем, в результате получали чешуйки металла. По-моему, именно из-за того, что горячий металлический пузырь не удавалось мгновенно охладить, а при медленном и скорее всего неравномерном охлаждении кристаллизация начиналась в одной точке и, распространяясь по стенке, нарушала целостность оболочки.

В 70х годах теоретики ЛТС утверждали, что для сильного быстрого лазерного сжатия годятся оболочки – мишени с несферичностью (вариации радиуса) на уровне 0.5-1.0% и с разнотолщинностью (вариации толщины оболочки) на уровне 3-5%. Однако, уже в конце 70х годов эксперименты и двумерные расчеты американцев показали, что эти цифры нужно уменьшить на порядок. Характерен при этом один момент, подчеркивающий различие позиций теоретиков и экспериментаторов. На конференции ECLIM (European Conference on Laser Interaction with Matter) в Москве в 1978 году молодой Девид Линдл (I.D. Lindl) набросился на Юрия Валентиновича



Рис. 32. Ю.В. Афанасьев

Афанасьева (см. рис. 32) после его доклада с множеством соавторов, в котором обсуждался микровзрыв крупной оболочечной мишени с аспектным отношением около 70 (аспектное отношение – отношение радиуса к толщине стенки). Девид с жаром утверждал, что по его двумерным расчетам такая оболочка развалится, пройдя путь в 10 толщин оболочки. Надо сказать, что в первых расчетах Линда было не все учтено.

Не буду описывать дальше дискуссию, а приведу пример отношения к такому вопросу экспериментатора - Ю.А.

Зысина, заместителя научного руководителя ВНИИТФ (Всесоюзного научно-исследовательского института технической физики в г. Снежинск – Челябинск-70). В 1977



Рис. 33. В.Б. Розанов 1974 год

году он с женой, химиком по специальности, посетил помещения нашей группы, находившиеся на территории ФИАН, называвшейся «Питомник». Название это осталось от старых владельцев территории. Раньше там была подмосковная территория Ботанического сада (а сейчас это почти центр Москвы). Когда гости обошли все наши помещения и осмотрели технологические установки (печи

падения и пр.), познакомились с приборами для аттестации (характеризации) мишеней, Ю.А. Зысин стал расспрашивать меня о предельных возможностях технологии изготовления стеклянных оболочек, упирая на предельные возможности формирования самых тонких. Я удивился и сказал, что «ваши теоретики» (В.Б. Розанов, см. рис. 33 и Е.Г. Гамалий – выходцы из Челябинска-70) говорят о том, что аспектное отношение 50 это предел. Гость же заметил, что если есть возможность изготовить оболочку с аспектным отношением 1000 или даже 2000, то надо изготовить и испытать в эксперименте. «Мало ли что говорят теоретики, надо неустойчивости экспериментально исследовать. Надо искать возможность поправить теорию!» - сказал наш гость.

Супруга Зысина, провела у нас 2 дня, но, по-видимому, была несколько расстроена, т.к. не с кем было поговорить, не нашлось в группе ни одного химика, все физики или технари, осваивающие химию по мере надобности.

В 1975 году Н.Г. Басов, взяв Е.Г. Гамалия (теоретика, недавно переехавшего из г. Снежинска) и меня, приехал в Институт физической химии РАН к директору В.И. Спицыну, как я неожиданно узнал, чтобы предложить Виктор Ивановичу взять на себя все работы по созданию в нашей стране термоядерных мишеней для мощных лазеров. В разговоре В.И. Спицын узнал от Николая Геннадьевича и меня, что работы разнообразной и довольно сложной очень много, а национальной программы (хорошо финансируемой) на горизонте не видно. Тогда Виктор Иванович сформулировал тезис, который мне запомнился на всю жизнь: «Николай Геннадьевич, **мы готовы для Вас сделать все, что не составит для нас никакого труда!**». Бывают же мудрые люди! В отличие от нас смертных.



Рис. 34. Ю.А. Меркульев
1975 год

В июне 1975 года на Ученом совете ФИАН директор института Н.Г. Басов поставил вопрос организации в институте научной группы «Лазерные термоядерные мишени» и о выборах на должность старшего научного сотрудника меня – Меркульева Юрия Александровича (см. рис. 34). О этом я, находясь на «Питомнике», случайно узнал минут за 10 до начала моего выступления. Я рысью покрыл расстояние до ФИАН до основной территории (три трамвайные остановки) и вошел в конференц-зал, когда объявлялся мой доклад. Заседание, длившееся уже часа 2, подходило к концу, и Н.Г. Басов шепотом сказал: «Покороче». Я, еще не остывший от бега, азартно рассказал о проблемах изготовления миниатюрных сферических мишеней, в том числе многослойных, с точностью, характерной для полупроводниковой промышленности. Задал ехидный вопрос Андрей Николаевич Лебедев: «Пузырек сферической капле рождается в случайном месте. Как можно надеяться серийно производить дешевые термоядерные мишени - оболочки, если их надо отбирать одну из 10 миллионов?». Я, естественно, ответил, что это старое представление от KMS-Fusion, а сейчас у нас и за рубежом одна мишень получается из тысячи оболочек и мы ищем физические процессы, управляющие процессом движения полости в центр (симметризации). Ученый совет ФИАН быстро и благополучно для меня закончился. После окончания заседания ко мне подошел Бенсон Моисеевич Вул, руководивший созданием первых в СССР полупроводниковых приборов, и, поздравив

меня с избранием, сказал: «Я рад, что в ФИАН ведутся сложные технологические работы, которых в нашем институте становится все меньше и меньше».

Сферические мишени для первых лазеров несли в себе функцию изделия для микровзрыва. Они должны были быть идеальной сферической формы, иметь постоянную толщину стенки оболочки, не иметь шероховатости на внешней и внутренней поверхности, содержать внутри термоядерное горючие (дейтерий или DT-смесь), не содержать на поверхности пыли, иметь крепление для размещения в камере взаимодействия в фокусе лазера с точностью ± 5 мкм.

Для однопучковых лазеров требуются плоские или конические мишени, изготовление которых, как правило, не требует такого количества специфического технологического оборудования и прецизионных приборов для измерения сферичности, флуктуации толщины, шероховатости и пр. Поэтому на таких лазерах есть техники, которые готовят мишени к эксперименту. Если они, чего-то не могут сами, то просят специалистов из соседних групп нанести тонкий диагностический слой на напылительной установке, промерить толщину мишени на хорошем микроскопе или на сканирующем электронном микроскопе. В специализированную лабораторию термоядерных мишеней экспериментаторы с малых лазеров не обращаются.

В те же годы состоялся у меня случайный разговор, дело у меня было хозяйское, с Сергеем Ивановичем Никольским – руководителем отделения «В», в которое входила моя нейтронно-физическая лаборатория, заведующим которой был А.И. Исаков. Сергей Иванович сказал мне: «Вы за несколько лет добились определенных успехов в мишенной тематике. Но специализированные богатые лаборатории в Арзамасе-16 и Челябинске-70, создав свои группы, быстро обгонят вашу группу. Я советую Вам выбрать новую интересную тематику».

Я не послушал его совета, пытаясь держать свой коллектив на высоком научном и инженерном уровне, соревнуясь с разработчиками за рубежом. Секреты нашего лидерства (по сравнению с группами в других научных центрах в нашей стране) сводились к следующему. Во-первых, из-за практически полного отсутствия финансирования мы создавали технологию, опираясь на простые решения и создавая дешевые установки и приборы под конкретные задачи своими руками. Во-вторых, следуя принципам ФИАН, мы интересовались новыми идеями и начинали разработки по своей инициативе, тогда как наши коллеги в других научных центрах начинали работы, которые приказывало начинать начальство, что приводило к отставанию старта на несколько лет, а иногда десятки лет (начальство разное!).

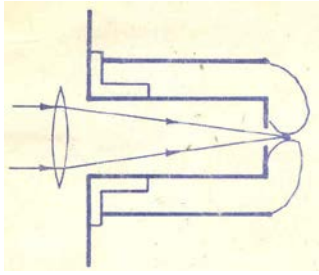


Рис. 35. Эмблема конференции в Польше

Первая встреча с иностранными специалистами по ЛТС произошла в 1975 году в Польше на Восьмой международной конференции по лазерному термоядерному синтезу. Символ конференции был выбран (см. рис. 35) по схеме дополнительного нагрева сжатого плазменного образования установки «плазменный фокус» лазерным излучением. Эту тематику долгое время разрабатывала группа В.А. Грибкова (см. рис. 36) нейтронно-физической лаборатории ФИАН в содружестве с учеными и инженерами Института микросинтеза в Варшаве. К сожалению, очень скоро оказалось, что в самом плотном пинче «плазменного фокуса» электронная плотность плазмы меньше критической плотности для излучения неодимового лазера (10^{19} 1/см³ или 3 мг/см³) и лазерное излучение слабо влияет на нейтронный выход. Хотя выход из «плазменного фокуса» порой достигал 10^{12} нейтронов за разряд с длительностью около 70 нс, а рекорд с DT-смесью достигал 10^{14} - 10^{15} .



Рис. 36. Г.В. Склизков с дипломником В.А. Грибковым.

На конференции ко мне подошел Д. Александер (из США), занимающийся до сих пор криогенными мишенями, попросил отписки наших публикаций, передал привет мне от Чака Хендрикса (Chuck Yendricks), предложил написать несколько слов на отписке Чаку. Хендрикс был руководителем лаборатории мишеней в LLNL в Ливерморе, оставаясь долгие годы самым плодовитым изобретателем в нашей и других областях. В следующем году Чак приехал для встречи с моей группой, но нам не дали встретиться. Позднее мои коллеги встречались в США с Хендриксом и даже подружились с этим обаятельным человеком,



Рис. 40. А.А. Самарский

кстати знавшим хорошо русский язык.

Конференция в Польше и поэтому советская делегация во главе с Н.Г. Басовым была самая многочисленная. Кстати в ней была большая группа математиков во главе с А.А. Самарским (см. рис. 37), с некоторыми из которых (С.П. Курдюмов см. рис. 38, Е.И. Леванов см. рис. 39), увлекавшихся тогда биополями, я подружился. Особенно, уважение ко мне многие почувствовали после того как по дороге в Польшу я восстановил движение остановившегося



Рис. 38. С.П. Курдюмов



Рис. 39. Е.И. Ливанов

нашего поезда, закрыв в тамбуре открытый аварийный воздушный клапан. Мы ехали в международном вагоне и после долгого вечернего чаепития пошли спать. В таких вагонах купе трехместное узкое в высоту. В.Б. Розанов, у которого было верхнее место, не воспользовался мягкими поручнями и лесенкой, а по спортивному подтянулся на руках и прыгнул наверх. Поезд сразу резко затормозил и из тамбура раздался свист. Дело в том, что Вячеслав Борисович подтягивался на ручке стоп-крана, свисавшей на ремне. Система работает на сжатом воздухе. Я вышел в тамбур и закрыл клапан сброса давления, помахав в окно машинисту и кондуктору, которые бежали к нашему вагону по полотну железной дороги.

Конечно, на конференции присутствовали ученые разных стран (Японии, Англии, Франции, Италии, ФРГ и ГДР), но мишени показывали только американцы. Холзрихтер из Ливермора отозвал Г.В. Склизкова и меня в сторонку (правда, мы не смогли избавиться от Александра) и показал запаянные в оргстекло 4 маленькие (диаметр меньше 100 мкм) стеклянные мишени, покрытые тонким слоем металла. На вопрос Глеб Владимировича: «А для Кальмара диаметром 200-300 мкм вы сделать можете?» Последовал уклончивый ответ «Пока нет». А мы уже приготовили свои печи падения для изготовления крупных (до 300 мкм) стеклянных мишеней. В докладе я заявил, что технология изготовления оболочек в печах падения имеет чисто физические ограничения, предел находится на

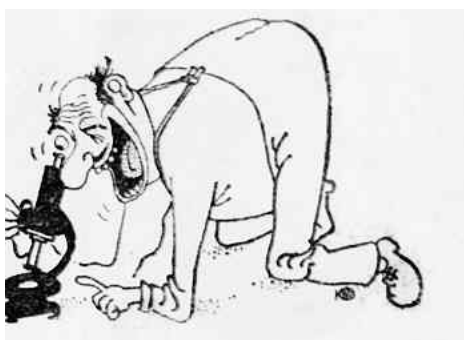


Рис. 40. **Фабрикатор** мишеней нашел хорошую мишень. (Рисунок я скопировал в 1974 году с юмористической страницы какого-то журнала, в журнале под ним была подпись «окно в мир науки»).

уровне диаметра оболочки 1 мм. Я не предполагал, что через 15 мы будем работать над развитием нашей технологии изготовления крупных (>2 мм) оболочек. Свое выступление в Польше я заключил шуточным слайдом, на котором по моим словам показан сотрудник, обнаруживший под микроскопом хорошую оболочку – мишень (см. рис. 40). Всем участникам конференции этот рисунок понравился.

Очень интересен был там еще один случай. В конце своего доклада Г.В. Склизов привел прогноз скорости строительства новых крупных лазерных установок. График выглядел как

$$P=A \cdot t^{1/3} \text{ или } P=[1-\exp(-at)] \cdot 10 \text{ в МДж}$$

слушатели бурно возражали, считая, что функция просто экспоненциальная или, в крайнем случае, линейна. Чтобы не обижать Н.Г. Басова, азартно верившего в светлое будущее ЛТС, Глеб Владимирович отшутился, сказав, что сделал слайд в спешке. На самом деле прогноз был правильный. Имевший уже большой практический опыт экспериментатор ясней понимал возможности производства, чем теоретики – руководители.

Еще несколько слов об организаторе конференции профессоре С. Калиски. Он имел чин генерала и был Министром науки, учредителем Института физики плазмы и микросинтеза в Варшаве. К тому же он, как многие поляки был азартным ученым и гонщиком. В те годы американцы объявили, что они разработали нейтронную бомбу и все физики обсуждали возможный принцип ее работы. Через небольшое время после конференции профессор официально объявил, что раскрыл секрет нейтронной бомбы и его сотрудники провели ряд успешных опытов. По-моему, это стоило ему жизни. Он с супругой погиб в загадочной автомобильной катастрофе, когда на умеренной скорости 120 км/час у его машины отвалилось колесо. Сказали, что гайки были слабо закручены. После этого опыты по получению нейтронов при взрывах в Польше быстро прекратились.

На конференцию в Польшу не приехали, указанные в предварительной программе Дж. Накколз - директор из Ливерморской лаборатории, теоретик - И.Д. Линдл, М. Любин - руководитель лаборатории лазерной энергетики Рочестерского университета и, к моему сожалению, Ч. Хендрикс.

5. Несколько слов о нобелевских лауреатах по физике и мании величия.



Рис. 41. Д.В. Скобельцын

Физический институт им. П.Н. Лебедева ведет свою историю от кунцакамеры и содержит в своем послужном списке множество имен знаменитых ученых. Одним из самых известных является Дмитрий Владимирович Скобельцын (см. фотографию на рис. 41). Он был директором института, когда я пришел в ФИАН уже более 10 лет и возглавлял институт еще лет 8, работая после этого почетным директором. Он выступал на общеинститутских комсомольских собраниях (а тогда практически все молодые были комсомольцами) и, вдохновляя нас на трудовые подвиги, говорил: «Вам сейчас хорошо, вы смолodu можете заниматься наукой, я-

то только в 32 года в 1918 году начал заниматься наукой». Но уже в 1960 году он был академиком, высочайшим экспертом в ядерной физике и физике космических лучей. Он первым наблюдал позитрон, но постеснялся опубликовать результаты (подробнее в статье Б.М. Болотовского или в книгах о Д.В. Скобельцыне).

В моей статье часто упоминаются известные ученые, академики и нобелевские



Рис. 42. Ю.А. Меркульев, 1960 год

лауреаты, но это особенность сотрудников ФИАН. В связи с этим расскажу правдивую, но на вид анекдотичную, историю. В начале своей работы в ФИАН (см. рис 42) я трудился в лаборатории Ильи Михайловича Франка, академика и нобелевского лауреата. Как-то раз один из аспирантов и мой товарищ после нервного срыва попал в психиатрическую лечебницу, а я пришел его проведать и подкормить. Лечащий врач вызвала меня в свой кабинет и, закрыв дверь, сообщила мне, что у моего приятеля мания величия, т.к. он утверждает,

что работает в лаборатории нобелевского лауреата. На что мне пришлось объяснить лечащему врачу, что таких «шизиков» 150 человек, включая меня, а есть еще теоретдел во главе с другим лауреатом И.Е. Таммом и лаборатория П.А. Черенкова (еще человек 100). Тогда еще Н.Г. Басов и А.М. Прохоров не получали нобелевской премии. Так, что затем таких «больных» стало под 5 тысяч в руководимых ими институтах.



Рис. 43. Ю.А. Меркульев, 1965 год (было чего бояться И.М. Франку).

Конечно, я мог бы сказать, что Илья Михайлович выделял меня из общего окружения и издали здоровался со мной, тогда как обычно шел задумчиво, иногда ведя пальцем по стене. Но объяснить его приветливость было легко. Экспериментальная установка и ускоритель – импульсный нейтронный генератор, на которых я работал, располагались на двух этажах (пультная на первом, а ускоритель с установкой в подвале) и раз в 15 минут я бегал вниз, чтобы изменить условия опыта. Во мне тогда было около 100 кг спортивного веса (см. рис. 43). Поэтому, чтобы избежать столкновения с бегущим навстречу носорогом, Илья Михайлович издали громко здоровался. Я всегда проносился в 1.5-2 метрах от шефа, как и от других сотрудников лаборатории атомного ядра, но он страховался. Несмотря на высокий ранг И.М. Франк не был для меня идеалом выдающегося ученого. Для меня, как и

многих в Лаборатории атомного ядра, идеалом был Федор Львович Шапиро, который в себе совмещал талант экспериментатора с блестящим владением математическим аппаратом физики. Он, ветеран войны, ежедневно по 14-16 часов непрерывно мог работать на установке «свинцовый куб», в которой быстрые 14 МэВ нейтроны медленно теряли свою энергию, поэтому измерялись ядерные реакции в зависимости от времени (т.е. от энергии). А его молодые аспиранты падали в обморок от усталости. К сожалению, Федор Львович рано умер, а то бы был одним из тех, кто показывал бы в ФИАН, что знаменитым ученым можно быть и не являясь нобелевским лауреатом.



Рис. 44. А.В. Антонов

Я начинал работу в группе Анатолия Васильевича Антонова, бывшего на фронте во время войны, (см. рис. 44), который любил и хорошо знал художественную литературу, был не прочь посмеяться и увлеченно собирал анекдотические

случаи из производственной жизни сотрудников ФИАН и не только нашего института. Надо было бы поделиться ими, но, к сожалению, это статья о попытках получить ядерный взрыв в микро масштабе и работах над предметом взрыва – термоядерными мишенями.

В работе группе А.В. Антонова помогал теоретик Михаил Вениаминович Казарновский, кумир всех электронщиков ФИАН Игорь Владимирович Штраних и радиоинженер Саша Волков. В те времена применялась ламповая электроника, которая часто ломалась, и чинящие ее радиоинженеры были самыми веселыми людьми, чувствующими свою полезность. Пришел на работу, аппаратура не работает,



Рис. 45. Научный работник – пессимист, радиоинженер – оптимист

поковырял тестером и паяльником, все заработало и можно спокойно идти домой. А научный сотрудник, как правило, вечно недоволен собой из-за того, что не успевает закончить исследования к началу какой-нибудь конференции или совещанию. Поэтому у меня перед глазами всегда была открытка, которая уже истрепалась (см. рис. 45).

Я конечно благодарен за учебу своим старшим товарищам, но должен сказать, что научная школа ФИАН отличалась тем, что вас учили все окружающие: научные сотрудники, инженеры и, особенно, старшие лаборанты и механики (мои четыре Ю: Юра Рыбаков, Юра Дмитриенко, Юра Шанин и Юра Соснин). Вообще в то время такой жесткой специализации не было, поэтому сотрудники лаборатории И.М. Франка, уезжая в лабораторию Нильса Бора в Данию, должны были (в Дании) вытачивать себе фланцы к мишеням ускорителя частиц на станках, которые были в механической мастерской. Я мог бы о каждом сотруднике лаборатории рассказать какие-то истории и сказать несколько теплых слов, но, к сожалению, цель моей статьи другая.

Высокий научный уровень работ ФИАН в целом и отдельных его сотрудников определялись общей творческой атмосферой ФИАН с его общемосковским теоретическим семинаром В.Л. Гинзбурга, разговорами и консультациями в очереди в столовую и т.д. Очень удобно было попросить фотоумножитель, радиолампу или пропорциональный счетчик ядерных частиц (фиановцы всегда жили бедновато и было принято помогать друг другу). ФИАН всегда славился своей обширной старинной библиотекой, в которой я находил книги и журналы столетней давности. Я пользовался рецептами М.В Ломоносова по производству императорского стекла (хрусталя) красного цвета из-за того, что золото в нем находилось в виде наночастиц (коллоидное золото).

Если размер частиц увеличивался, то цвет его портился. Я черпал сведения о том, как работать руками, из справочника физика-экспериментатора 1926 года издания под редакцией А.Ф. Иоффе, когда из воллостоновой нити (тонкой микронной платиновой нити в серебряной оболочке) делал датчики уровня с точностью около 5-10 мкм. А нити с платиной толщиной 0.5 мкм и 1.5 мкм в серебряной оболочке из Германии в 1926 году привезли С.И. Вавилов и Д.В. Скобельцын.

Была правда еще небольшая группа спецхраны, которая проверяла на входе и выходе наши пропуска (перезитки проекта «атомной бомбы»). С этими ребятами мы были в товарищеских отношениях. Но были и исключения. Как-то появился у нас молоденький охранник, который читал пропуск при входе и выходе по 2-3 минуты (по инструкции на это он имел право). Меня это злило необыкновенно, т.к. раз в 2 часа я должен был выбегать на улицу менять баллоны с азотом на рампе (расход азота в установке был большой). При этом «молодой» (фамилию его я не называю, чтобы его дети и внуки не смеялись над ним) держал пропуск в руках долгое время (остальным ребятам на бегу можно было просто махнуть рукой). Тогда я решил его проучить. Надев ботинки на толстой капроновой подошве (изолятор) и брюки из грубой шерсти, на подобранном стуле я «натирал» на себя статический электрический заряд (по осциллографу напряжение было около 15 кВ). Когда я давал охраннику пропуск между нашими пальцами возникал осязаемый и видимый разряд (искра), при этом я говорил, что работа в «атомном ядре» очень вредная, и интересовался как у него дела с девушками, утверждая, что очень скоро они перестанут его интересоваться. Через 2 недели мой мучитель перевелся в другую организацию.

В ФИАН можно было найти ученых-экспертов в любой области физики, техники и электроники и проконсультироваться, несмотря на большую разницу в ранге и возрасте. В конце 50х и в 60х в нашей стране еще очень ценили экспертов – «технарей», которые поднимали уровень высшего образования, работая в вузах на полставки. Тогда как сейчас руководство страны и Министерство науки, наполненное служащими и экономистами, делает все, чтобы утопить науку и образование в нищете и отключить «технарей» высокого уровня от принятия ответственных государственных решений. Принимают важнейшие для страны решения офицеры, юристы и изобретатели фильтров для воды.

6. Технология изготовления термоядерных мишеней для лазеров с энергией до 10 кДж.

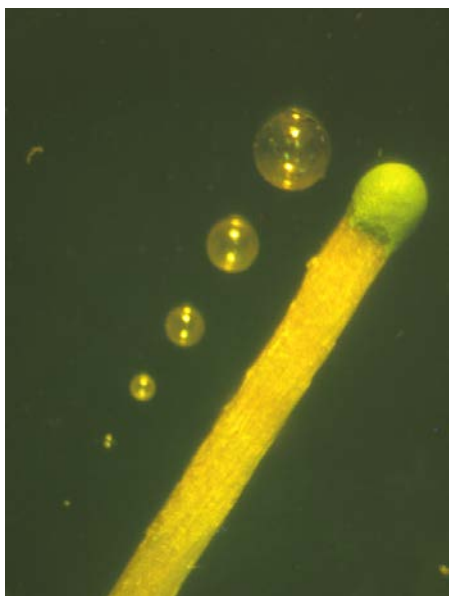


Рис. 46. Шесть стеклянных оболочек: сверху вниз для лазеров 300, 100, 30, 10 и 2 кДж

Для того, чтобы дать представление о размерах капсул для DT-смеси – термоядерной мишени (предшественников основного элемента для термоядерного микровзрыва) на рисунке 46 стеклянные капсулы расположены рядом с обычной спичкой. Надо сказать, что первые работы на установке «Кальмар» нуждались в мишенях диаметром в 2-3 раза меньше, чем самая маленькая оболочка – шестая оболочка, считая сверху вниз, которая с трудом различается на микрофотографии. Ниже в статье я буду рассказывать, как мы поставляли мишени, увеличивая размеры снизу вверх.

Но сначала несколько общих замечаний. Размер оболочек кажется незначительным для неспециалиста. Я это понял, когда по просьбе Н.Г. Басова демонстрировал образцы (размером похожие на второй сверху) Министру энергетики СССР П.С. Непорожнему. Он долго пил чай с Н.Г. Басовым, а я ждал в другой комнате. Он, уходя, быстро начал надевать шубу и шапку (дело было зимой). Поскольку он не подошел к микроскопу, то я на словах объяснил, что если заполнить такую оболочку DT-смесью до 1000 атм. и взорвать, сжигая 50%, то будут убиты все люди, находящиеся в нашем пятиэтажном корпусе. Министр снял шапку и шубу, сел к микроскопу и сказал: «Такая соплюшечка и всех людей! Невероятно!» (конечно, как принято у министров или членов Политбюро КПСС, от которых он приехал к директору ФИАН, он применял более крепкие нецензурные выражения).

Урок демонстрации мишеней я получил, когда на «Дельфине» в 1980 г. принимали высоких чиновников из США. Оболочки из уранового стекла лежали в поле зрения люминесцентного микроскопа, сияя зеленым цветом как колечки, а рядом стояла прозрачная коробочка с натуральными мишенями для «Кальмара», висящими в рогатке на тонкой нити из резинового клея (см. рис. 47). Все по очереди глядели в микроскоп и задумчиво отходили. Вдруг один из посетителей, показывая на коробку, почти закричал: «Я их вижу!». Я понял свою ошибку. Те, кто не привык пользоваться

микроскопом, не могут восстановить изображение образца по его проекции в поле зрения микроскопа, а без микроскопа различают даже малые оболочки-мишени.

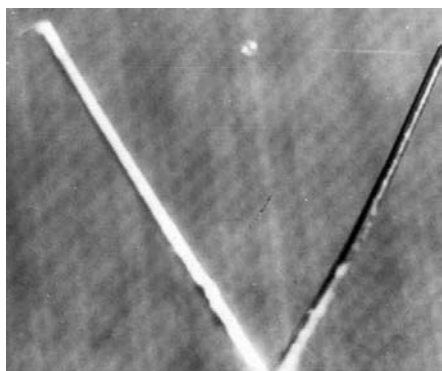


Рис. 47. Мишень диаметром 400 мкм на нити подвеса для лазера «Кальмар»

Крепление мишеней для «Дельфина» представляло собой иголку – утоньшающуюся к кончику стеклянную трубку (см. рис. 48), на которую приклеивалась оболочка-мишень. Стеклянная трубочка вставлялась и приклеивалась к металлической трубке. В верхней части трубки видна площадка, в которой должны были быть микроотверстия (камеры обскура для получения изображения в α -частицах). Но энергичные α -частицы (3.5 МэВ) рождаются только в D+T

реакциях. К сожалению, мы смогли поставлять мишени с DT-смесью только тогда, когда «Дельфин уже переставал стрелять».

Надо сказать, что основная потребность в мелких оболочках была в химической



Рис. 48. Стеклянная мишень в мишенном узле «Дельфина»

промышленности, производившей полые наполнители для так называемых синтактных пластмасс. Полые стеклянные микросферы – торговое название крупной американской фирмы 3M - стеклянные микробаллоны (glass microballoons GMB) производились в больших масштабах (тысячи и даже десятки тысяч тонн в год) для пластмассовых перегородок в подводных лодках, кораблях и самолетах. Для автомобильной промышленности их производства не хватало. Первые мишени из таких продуктов стали производить в фирме KMS-Fusion.

Для этого там сделали технологическую линию – набор приборов для отбраковки, отбора и сортировки стеклянных оболочек. Фирма продавала такие мишени по контракту со стоимостью не меньше 50000 долларов США за тысячу оболочек. Такое количество мишеней – оболочек никому не нужно, расходуются в лучшем случае около сотни, но условия контракта были жесткие, меньше купить было нельзя.

Аналогичную продукцию GMB у нас в стране производили разные заводы, но ближе было НПО Стекловолокно в деревне Андреевка рядом с Зеленоградом. С технологией производства меня познакомили М.С. Асланова, главный химик предприятия, А.Г. Галушкин разработчик технологии и В.Я. Стеценко - один из разработчиков технологии изготовления полых микросфер из окиси алюминия.

Исходным продуктом для производства стеклянных оболочек были мелкие порошинки из геля жидкого стекла (в быту, сушеного силикатного клея). Этот порошок продувался сквозь специальные форсунки Галушкина вместе с природным газом, который, сгорая, нагревал, вспенивал порошок и обжигал стеклянные оболочки. Мелкий порошок был неоднороден по размеру, и траектория различных частиц в пламени была различной, поэтому получался разнородный со средним диаметром 25-30 мкм и насыпной плотностью около 0.2 г/см^3 . Широкий спектр размеров микросфер даже лучше для увеличения концентрации наполнителей в пластмассе.

Любой человек может увидеть начальный период формирования полых стеклянных микросфер, если высушит несколько капель силикатного клея, накрошит его и нагреет порошок на кухне в пламени газовой горелки, насыпав порошок на металлическую крышку от стеклянной банки. Раздается треск, порошинки прыгают и раздуваются. Звук раздается потому, что скорость роста пузырька силикатного геля около скорости звука. Получаются тонкие оболочки, играющие разными цветами из-за интерференции света в стенках оболочек. Можете полюбоваться ими через увеличительное стекло, перед тем как выбросить. Хранить их бессмысленно, т.к. силикатный клей быстро реагирует с углекислым газом воздуха. Получается сода с примесью мелкого кварцевого песка.



Рис. 49. Справа печь падения для изготовления стеклянных оболочек

Мы у себя на «Питомнике» развили технологию изготовления стеклянных микробаллонов из геля щелочных силикатов, используя лабораторную печь с водородной атмосферой, сделав из нее печь падения (см. рис. 49). Работала печь при атмосферном давлении с проточной подачей водорода от баллона. Водород сгорал, выходя из трубки. Стеклянные оболочки содержали образцы, которые уже можно было применять в экспериментах на лазерной установке «Кальмар», но оболочек с диаметром 400-500 мкм и аспектным отношением 50 для строящегося лазера

«Дельфин» производить не удавалось. Высота горячей зоны печи была 200 мм. Здесь надо признать мою ошибку. Не произведя расчетов, я задал высоту зоны охлаждения более 1 метра, тогда как достаточно было 20 см.

Исходная лабораторная печь не была рассчитана на работу при температуре 1450К-1500К (по паспорту до 1350К). Из-за плохой теплоизоляции (плохая пористая окись алюминия) внешний корпус прогорал. Поэтому печи приходилось менять через каждые 3-4 пуска. Я знал, что сажа хороший теплоизолятор, и мы насыпали в одну из печей сажи. Каково же было наше удивление, когда печь после интенсивного нагрева стала давать интенсивную струю, похожую на струю из ацетиленовой горелки. Мы срочно выключили печь. Потом я в справочнике химика обнаружил, что мы реализовали один из способов получения ацетилена.

Фирма KMS-Fusion построила у себя печь падения для изготовления стеклянных оболочек – мишеней из силикатного геля и опять предлагала купить у нее мишени по дорогущим контрактам.



Рис. 50. Чак Хендрик



Рис. 51. Фотография на интерферометре оболочек диаметром 150 мкм в США

В Ливерморской лаборатории США коллектив во главе с Чаком Хендриксом из LLNL (см. рис. 50) разработал и изготовил аналогичную печь падения (на базе стандартной лабораторной печи с температурой до 1500К). В этой печи в верхней части располагалась капельница для силикатных растворов (жидких растворов силикатного клея) с высокой (7 метров) зоной сушки капель и формирования сверхтонкостенных пузырей из геля. Именно Чаку Хендриксу принадлежали патенты на специальные капельницы, в том числе и для жидкого водорода (и даже полых капель). За основу была взята технология изготовления стеклянных полых микросфер фирмы Филадельфия Кварц США, которая из капель производила также в больших объемах калиброванные оболочки диаметром 70 мкм. Технология изготовления стеклянных мишеней в LLNL была доведена до совершенства (см. рис. 51). 90% оболочек с диаметром 150 мкм и толщиной стенки 15 мкм имели разнотолщинность (эксцентриситет внутренней полости и внешней поверхности) менее 5%. Однако для более крупных оболочек (1 мм и более)

такая технология не подходила, т.к. для сушки больших капель требовались башни высотой более 50 метров.

Здесь надо еще сказать, что печи с капельницей принципиально не могут работать при низком давлении газа. А как было показано позже группой В.М. Дороготовцева в нашей лаборатории мишеней вакуумные печи имеют существенное преимущество – дают оболочки с более совершенной симметрией, при этом оптимальное отношение гелия к аргону 2:1 (давление смеси гелия и аргона на уровне 10^4 Па).

Почти всем нашим и зарубежным участникам гонки по ЛТС (а не участникам тем более) казалось, что в группе мишеней работают только девушки, которые под микроскопом отбирают и приклеивают оболочки. На самом деле, работа в группе мишеней состояла из разработки технологии изготовления оболочек, обладавших высокой симметрией, изготовления технологического оборудования своими руками, создания своими руками специальной аппаратуры для контроля и сортировки оболочек – мишеней и подготовки и поставки мишеней в лазерные эксперименты. Единственный



Рис. 52. Группа мишеней в 1977 году. Слева направо: А.И. Громов, А.И. Никитенко, Е.Р. Рычкова, Е.А. Очаговская, В.С. Бушуев, Л.И. Крупинина, Р.Н. Тракторников, В.М. Дороготовцев

хороший покупной поляризационный микроскоп фирмы Цейс, исправно служащий нам до сих пор, передан был нам в 1976 году Ю.А. Михайловым, которому мы благодарны все эти годы.

Наша группа (см. рис. 52) работала в нейтронно-физической лаборатории (руководитель А.И. Исаков), принадлежавшей отделению «В», финансирование которого всегда было крайне скудным. Дополнительное финансирование на работы по

термоядерному синтезу выделяло Государственный комитет по атомной энергии ГКАЭ Министерства среднего машиностроения (Минатом). Но когда распределялись деньги в планах на десятилетия вперед, которые отдельно записывались для отделений «Б» (Н.Г. Басова) и «В» (на мишени), один из ведущих экспертов ЛТС из «Б», заявил на совещании, что на мишени денег много не надо - химическая посуда и пинцеты стоят не дорого. Поэтому нам срезали почти все, оставив самую малость, и основные средства долгие годы шли в отделение «Б». Может быть, если денег было бы больше у группы мишеней, то наши новые предложения по конструкции мишеней принесли бы

работам в коллективе Н.Г. Басова больше пользы, чем деньги, которые у них всегда были в заметном количестве за работы по оборонной тематике. Мне после заседания в ГКАЭ позвонили сотрудники Курчатовского института, присутствовавшие при дележе денег, и рассказали кто наш «благодетель». Этот случай я до сих пор (а прошло более 35 лет) воспринимаю как момент, когда развитие работ по мишеням было существенно заторможено.

Нашей группе приходилось выполнять хоздоговорные разработки, совершенно не связанные с изготовлением мишеней, чтобы иметь деньги хотя бы на материалы. По тогдашним законам на деньги хоздоговоров академические институты не могли покупать оборудование и платить зарплату, а только покупать материалы или нанимать субподрядчиков. У нас не было возможности купить хорошие микроскопы (тем более интерференционный микроскоп, не говоря уже о микроскопе с компьютерной обработкой изображения), поэтому разработкой сложной аппаратуры для контроля симметрии оболочек занялся Андрей Иванович Никитенко, авторитет которого в нашей группе был всегда выше моего. По-моему, ему было неприятно заниматься химической технологией, которой я увлекался, комбинируя силикатные составы и добавки (об окиси урана уже говорилось выше). Действительно, этих поисков от нас никто не требовал, это была сверхплановая работа, но она давала нам возможность хотя бы в очень узких направлениях перегонять американских разработчиков мишеней. Финансирование работ по технологии мишеней в США превосходило то же в СССР в сто раз. Это было, казалось бы, безнадежное соревнование Элочки-людоедки с американской миллионершей по «Золотому теленку».

Возможно, А.И. Никитенко не устраивала технологическая работа с Валерием Михайловичем Дороготовцевым, сотрудником трудолюбивым, но непослушным и упрямым, отвергающим чужие доводы и желающим сделать все по-своему. А, возможно, Андрею Ивановичу были непонятны мои поиски разнообразных химических составов стекла для мишеней, которых в самых напряженных случаях нужно было всего 100 – 200 штук в год. Устроить исследования влияния примесей на степень сжатия плазмы фактически не было возможности. Единственный случай это стеклянные оболочки с наночастицами серебра, о котором мы ниже расскажем отдельно. Согласование с диагностами плазмы набора необходимых диагностических элементов в мишени требовало от мишенщика определенного нахрапа, на что Андрей был в принципе не способен, это была моя функция.

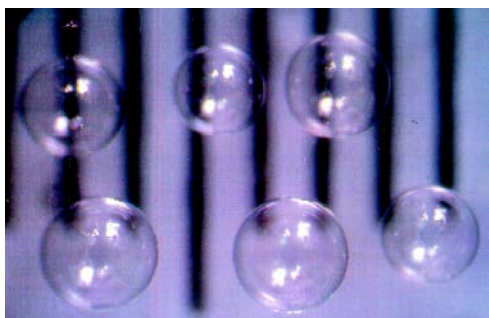


Рис. 53. Полистирольные оболочки на линейке с ценой деления 1мм



Рис. 54. Н.М. Козырева

Второй разновидностью оболочек мишеней были полимерные (полистирольные) мишени (см. рис. 53). Для их изготовления не требовалось слишком высоких температур (выше температуры нагревателя из сплава-3, 1500К). Такие печи с кварцевыми трубами внутри вакуумных труб из нержавеющей стали мы сами делали. Но нужны были хорошие исходные гранулы из полистирола, и, как мне тогда казалось, из дейтерированного полистирола. Мы обратились с просьбой о помощи на кафедру полимеров Василия Васильевича Коршака в МХТИ (Московский химико-технологический институт). Мы с ним договорились, что нам в рамках хоздоговорной работы будет помогать коллектив во главе с Натальей Михайловной Козыревой (см. рис. 54). Постепенно, изучая химию полимеров, я уточнял наши требования к исходным гранулам и, поскольку ГИПХ в Ленинграде не производил дейтерированный полистирол, купил дейтерированные бензол и формальдегид. Встречаясь через год по делам с В.В. Коршаком в ИНЭОС РАН, я получил комплимент. Он сказал, что за прошедший год я многому научился, и он уже может разговаривать со мной как с химиком. Настоящими химиками мы не стали, т.к., зная, что точка быстрого разложения полимера – полистирола 840К, производили оболочки при температуре печи до 1070К. Производили, потому что в полученном материале было больше симметричных оболочек, нарушая запрет химиков. Мы объясняли устойчивость полистирола тем, что существует некоторый период времени, когда полистирол готовится к быстрому разложению, в оболочки проходят через горячую зону за несколько десятых долей секунды. А для сохранения симметрии оболочки хорошо, что она еще горячая на высокой скорости попадает в холодный газ зоны охлаждения и быстро затвердевает. Поиск оптимальных режимов изготовления полистирольных оболочек выполнял на Питомнике в течение 6 лет В.М. Дороготовцев с Ниной Семеновной Кобец и студентками-дипломницами из МХТИ.

Аналогичную технологию изготовления полистирольных оболочек (но при более умеренных температурах) применяли в Ливерморской лаборатории США и ряде

других научных центров. В Японии в Институте лазерной техники при Университете г.



Рис. 55. Т. Нориматсу

Осака в группе Т. Нориматцу (см. рис. 55) разрабатывали технологию изготовления полистирольных оболочек методом микрокапсулирования. На лазерной установке Гекко-ХП (Gekko-HP) в 80х годах были проведены исключительно красивые опыты с оболочками из дейтерированного полистирола, показавшие возможность сжатия плазмы до плотности 600 г/см^3 (т.е. почти в 600 раз выше плотности начального вещества). В этой группе был произведен изотопный обмен дейтерия на тритий до 12% (вместо необходимых 50%). Дальнейший обмен был ограничен, по нашему мнению

[40], из-за разложения полистирола под действием β -частиц при распаде трития.

Понимая, что нам не выполнить обязательства перед лазерной установкой «Дельфин», мы начали искать возможность изготовления новой крупной печи падения для изготовления стеклянных оболочек диаметром до 3 мм. Мы желали сделать установку побольше с запасом на еще хотя бы один скачок в энергии лазера. Замечено, что лазерные термоядерные установки строятся каждый раз с увеличением энергетики на порядок. Например, у нас «Кальмар» 0.5 кДж (по проекту даже 1 кДж) и «Дельфин» 5 кДж (по проекту 10 кДж), в США в Рочестере «Зета» 5 кДж, «Омега» 50 кДж для прямого облучения мишеней, и «Шива» 10 кДж, «Нова» 100 кДж для непрямого облучения мишеней.

Если энергетика лазера растет в 8-10 раз, то по законам подобия диаметр мишени увеличивается в 2 раза (масса в 8 раз). Позже, когда я проделал расчеты (скорее оценки), я обнаружил, что высота горячей зоны печи падения пропорциональна шестой степени диаметра оболочки при аспектном отношении 50 ($H \approx A \cdot R^6$). Мы с В.М. Дороготовцевым поехали на консультацию во ВНИИЭТО (Всесоюзный научно-исследовательский институт электротермического оборудования) и выбрали там в качестве прототипа для нас горизонтальную печь с графитовым трубчатым нагревателем. Мы не знали, что есть более совершенные аналоги с лучшей теплоизоляцией (графитовый войлок вместо засыпной сажи) и с лучшей тиристорной системой электропитания (вместо автоматики полного отключения).

Я уговорил Н.Г. Басова дать нам возможность спроектировать и изготовить в ОКБ ФИАН новую установку. Не сразу, но при содействии А.И. Исакова, Н.Г. Басов согласился. И мы сдали в конструкторский отдел ОКБ (начальник Василь Василич Конашенков) чертежи прототипа и требования по компоновке оборудования.

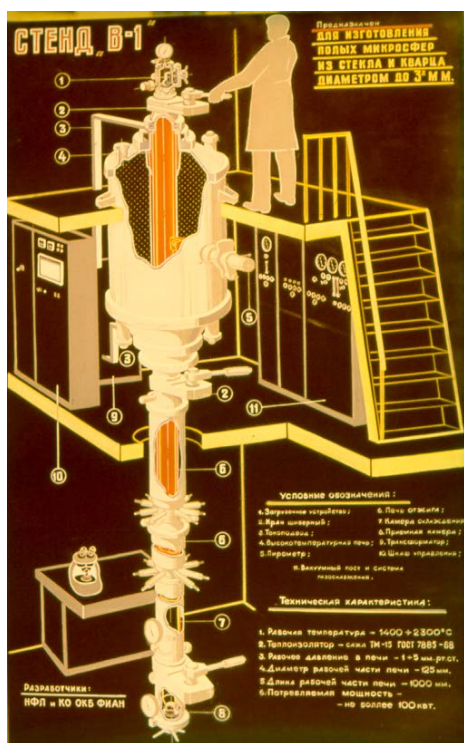


Рис. 56. Схема стенда-В1

Проектирование (основной конструктор Игорь Николаевич Железов) длилось 2 года (1978 и 1979) и затем изготовление еще 3 года. При этом за эти годы были нами съедены 70% нормочасов отделения «В». По просьбе Н.Г. Басова В. Зубков, выделил в лабораторном корпусе ОКБ две небольшие комнаты (на первом и втором этажах), т.к. печь получилась двухэтажная. ОКБ находилось в г. Троицк. В верхней комнате была еще сделана площадка на половину этажа по работе с загрузкой исходных частиц в печь. Опуская подробности покупки и прокладки толстого медного кабеля (печь была однофазная с максимальной мощностью 10 кВт) и получения права на работу у нас группы из спецмонтажа

(надо сказать, мастера были очень хорошие). К середине 1983 года мы запустили высокотемпературную вакуумную установку, которую стали именовать «Стенд В-1» (см. схему на рис 61). Максимальная температура по проекту 2800К, но выше 2500К мы не поднимались.



Рис. 57. В.Н. Ковыльников

К тому времени по просьбе Сергей Ивановича Никольского (конечно, по нашей просьбе, поддержанной ИАЭ им Курчатова) наше группе вице-президент Академии наук СССР Е.П. Велихов выделил 5 штатных единиц (из которых одну отобрала дирекция по решению парткома для общеинститутских нужд). Оказалось, что в нашей группе три жителя г. Троицка (Владимир Николаевич

Ковыльников см. рис. 57, Владимир Шиняев см. рис. 58 и Владимир Еремин). О последнем ничего хорошего сказать не могу и скоро мы с ним расстались, а два Володи по очереди дежурили при запусках печи, В.М. Дороготовцев – руководитель группы, Александр Алексеевич Акунец и я к тому времени заведующий сектором приезжали на основную часть работы. Печь разгонялась (по температуре до 1850К) за 6 часов, а



Рис. 58. В.Г. Шиняев и И.Н. Железов

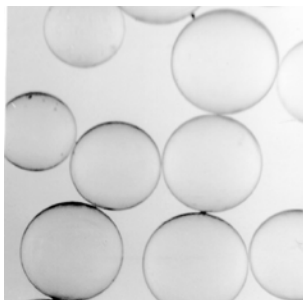


Рис. 59. Микрофотография стеклянных оболочек.



Рис. 60. В.Т. Пунин с сотрудницами на фоне нижней части камеры взаимодействия лазера «Искра-5»

остывала за 12 часов. Один запуск «Стенда-В1» длился в течение 2-3 суток. Фотографии стеклянных оболочек даны на рис. 59.

С начала 1982 года мне не давали прохода, утверждая, что «Дельфин» не работает, т.к. нет стеклянных мишеней, заполненных дейтерием. Я говорил, что есть полимерные мишени нужных размеров и стеклянные мишени диаметром до 700 мкм, но с аспектным отношением больше 300. Мои оправдания принимали не все. Вообще, по-моему, во многих лабораториях мира неудачи в экспериментах начинают искать, считая в первую очередь, что мишени плохие, а уже потом искать причину в неравномерности освещения мишени разными пучками лазерной установки, а главное в том, что теоретики, предсказывающие результаты будущих опытов, не учли какие-то физические процессы. С теоретиками эта беда постоянная во всех странах, но их лидеры как правило являются руководителями программ в разных научных центрах.

В большинстве научных центров мира руководителями программ и постановщиками задач для экспериментов являются теоретики. Только раз мне удалось пробить опыты при помощи Валентина Тимофеевича Пунина (см. фотографию на рис. 60), начальника лазерной установки «Искра-5» (йодный лазер с энергией 10 кДж, длительность вспышки 0.35 нс на полувысоте интенсивности) ВНИИЭФ г. Саров. Целью было получить высокий нейтронный выход при непрямом облучении крупных стеклянных мишеней, заполненных DT-смесью в «тесном» кожухе. Получили $5 \cdot 10^9$ нейтронов, это для «Искры-5» был очень хороший результат [44].

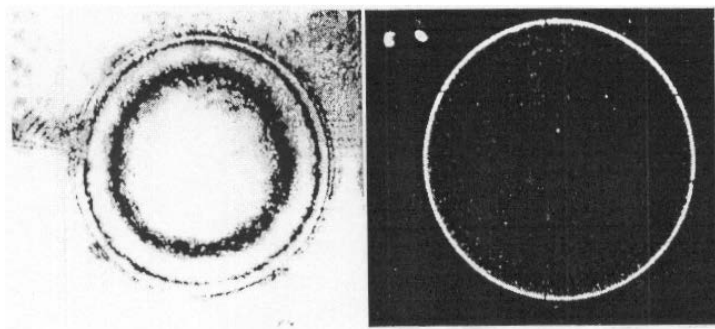


Рис. 61. Микрофотографии на интерферометре и в рентгеновских лучах из паспорта лазерной мишени

для микровзрыва!

Внутри нашего коллектива сложилось распределение труда. Была группа по изготовлению оболочек мишеней, в которую входили и те, кто использовал печи, и те, кто пытался найти новые материалы и специальные малоплотные полимерные вещества (Наталия Глебовна Борисенко, о работах которой мы будем говорить отдельно ниже). Была группа, которая разрабатывала аппаратуру отбора и контроля



Рис. 62. А.И. Громов

мишеней, оборудования для заполнения стеклянных оболочек дейтерием (а затем и DT-смесью), в этой группе было три человека, которые отвечали за поставку мишеней на лазер. В эту минигруппу входили Александр Иванович Громов (см. рис. 62) и две девочки оператора по работе с мишенями. Сначала пришла Лена Очаговская (см. рис. 63), а затем Таня Панюшкина (см. рис. 64). Это

только кажется, что работа по отбору, контролю и монтажу

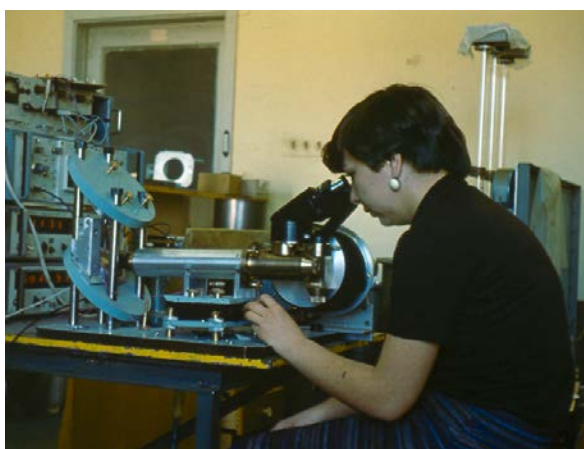


Рис. 63. Е.А. Очаговская контролирует мишени, используя интерферометр

мишеней простая легкая. В начале своей работы девочки каждый день плакали, т.к. не могли работать под микроскопом с заметным увеличением. А работа по отбору была такая, что в качестве их инструмента была приклеенная к иголке ресничка или колечко из тонкого человеческого волоса (микролопаточка).

Мы очень скоро убедились, что оборудование для специальной

Чтобы снять обвинения в плохом качестве мишеней, мы ввели в постоянную практику поставку мишеней с паспортом (см. рис. 61), в котором давали три интерферограммы с разных сторон, и фотографию после приклейки к игле. Напоминаю, что это прототипы оболочек

сортировки по всплыванию в жидкости и пр. и особого отбора оболочек по раздавливанию высоким давлением газа и взвешиванию в газе портит мелкие маленькие



Рис. 64. Т.В. Панюшкина за микроскопом с манипуляторами, для монтажа мишеней.

оболочки, на них появляется пыль и прочие дефекты. Работая с микроскопом, оператор среди разных оболочек почти мгновенно находит хорошую мишень и надо только ее извлечь из массива. Это как быстрый взгляд человека выхватывает в большой толпе красивых женщину или мужчину. Уже через 10 лет работы Таня Панюшкина к тому моменту Татьяна Васильевна

Чернявская говорила, рассматривая **без микроскопа (!)** принесенные В.М. Дороготовцевым чашки Петри со стеклянными оболочками: «Вот в этой и этой чашке ни одной мишени нет». А в каждой чашке по несколько десятков тысяч оболочек!



Рис. 65. Е.Р. Рычкова, 1976 год

Почти с самых первых работ по мишеням в нашей группе появилась Елена Ростиславовна Рычкова (потом ставшая Корешевой), окончившая МГУ по кафедре криогеники (см. рис. 65). На маленьких лазерах было не до криогенных мишеней и ей пришлось проявлять инициативу. Надо сказать, что инициатива у нее в крови (генетическая особенность) и до сих пор она самый инициативный сотрудник (главный научный сотрудник!) в лаборатории мишеней. Но о криогенных мишенях будет отдельный раздел ниже.

Хочется рассказать еще об одной работе, которая наглядно показала, что научно-технические разработки и в области мишеней являются гонкой престижа. В 1978 году я познакомился в Институте химической физики РАН с работами лаборатории Матвея Яковлевича Гена, разработавшего за 15 лет до нашей встречи технологию изготовления ультрадисперсных порошков металлов (ныне именуемых наночастицами). У меня было желание добавить в мишень, что-то, что приводило бы к возникновению сильной турбулентности в плазме.



Рис. 66. В.В. Сутормин

Меня М.Я. Ген снабдил каким-то количеством порошков разных негорючих металлов (меди, олова с серебром, никеля). Работу с этими порошками выполнял дипломник МИФИ Валерий Васильевич Сутормин (см. рис. 66). Мы с ним решили попробовать пробросить через нашу водородную печь высушенные кусочки порошка меди, предварительно смоченные нитроцеллюлозным клеем (тогда еще этот клей не

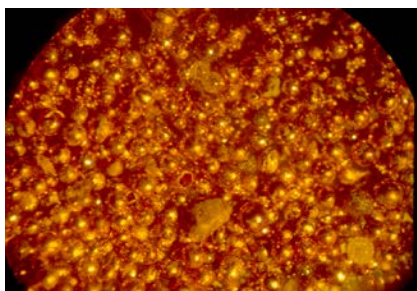


Рис. 67. Медные оболочки

запретили к продаже, как исходный компонент дымного пороха !). Клей должен был дать пузырь и исчезнуть, разложившись на газовые части. К нашему удивлению из печи вылетели полированные медные шарики диаметром от 200 мкм до 500 мкм (см. рис. 67).

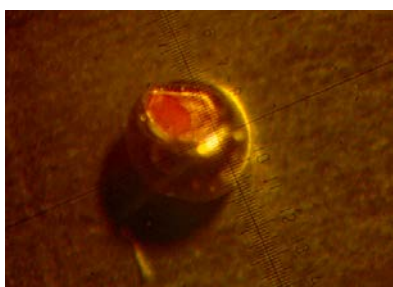


Рис. 68. Медная оболочка, проткнутая иглой.

Если проткнуть такой шарик иглой, то в некоторых обнаруживается большая полость (см. рис. 68), т.е. это оболочки! Тогда мы попробовали часть шариков окунуть в спирт, и оказалось, что некоторые из них плавают в спирте, что означало, что средняя толщина их стенок меньше чем 0.05 от радиуса!

Никакого интереса у наших теоретиков ЛТС медные оболочки не вызвали, но я в 1979 году дал несколько слайдов с медными оболочками, но без пояснения о методе изготовления, Г.В. Склизову для демонстрации на международной конференции по физике плазмы. С тех пор в течение 5-6 лет к нам приходили отчеты Ливерморской лаборатории о работах по технологии изготовления металлических оболочек.

Конечно, на наш способ они не наткнулись, но надо сказать, что он был не столь прост в реализации, как казалось в самом начале. Когда Валерий Васильевич стал улучшать методику, делать сам более чистый исходный коллоидный порошок меди и пр., то оболочки не получались, а получались чешуйки, похожие на маленькие морские звезды. Кроме технических возникли бытовые проблемы. У него не сложились отношения с руководителем группы В.М. Дороготовцевым. В.В. Сутормин был очень хорошо образован и все способен был сделать своими руками, чем-то напоминал А.И.

Никитенко, а Валерий Михайлович, обладая сравнительно слабым образованием, распорядился подчиненными и их работами как офицер в армии.

В.В. Сутормин, перейдя на теоретическую работу, выполнил несколько красивых расчетов и опубликовал их, а потом увлекся бизнесом, в котором сначала имел успех, а потом потерпел поражение. Я, оглядываясь назад, понимаю, что виноват в том, что талантливый человек не раскрыл у нас свои способности. Вообще я, как руководитель не состоялся. Как руководители в старом ФИАН, я лишь мог уговаривать сотрудников работать, увлекая идеями и перспективой, а также своим примером (я обычно работал по 14 часов в день), но жестко потребовать выполнения задания не умел.

Попытка изготовить медные оболочки на «Стенде В-1» дала отрицательный результат. Сказывалось отсутствие в атмосфере водорода. Позже я в одиночку приготовил такой же опыт но со сплавом меди и циркония, дающим при быстром охлаждении аморфный сплав. Получились разные частицы, среди которых были тонкостенные оболочки диаметром до 0.8 мм. Применения таким оболочкам я не нашел, и работа осталась незавершенной.

Много позже, когда в ФИАН начал постоянно работать Лев Петрович Феоктистов, он рассказал мне об одном интересном варианте эксперимента. Металлическая (из очень тяжелого металла) оболочка с отверстием для ввода лазерного излучения должна быть заполнена порошковой DT-смесью. В центр этой оболочки должна быть быстро введена большая энергия от лазера, т.е. длительность вспышки должна быть меньше 0.5 нс. Тогда по DT-смеси пойдет ударная волна, давление в которой при отражении от стенки увеличится в 10 раз, и при сжатии волны в центре возникнет зажигание DT-смеси. Я возразил, объяснив, что DT-смесь в виде малоплотного порошка при температуре жидкого гелия сделать очень тяжело, а DT-газ в оболочке с отверстием нельзя удержать, и системы фокусировки лазерного излучения имеют столь длинный фокус, что любое окошко на оболочке будет основной мишенью, где выделится вся лазерная энергия.

Лет за 15 до этого разговора на установке «Искра-4» а потом на «Искра-5» (ВНИИЭФ г. Саров) были проведены опыты с мишенями с обратной короной. Медный полый кожух диаметром 3 или 4 мм (некоторое подобие оболочки мишени), покрытый изнутри золотом и потом дейтерированным полиэтиленом (CD₂)_n, через отверстия облучался коротким лазерным импульсом.

Возникающий на внутренней поверхности поток плазмы сходился в центре кожуха, давая нейтроны по DD-реакции. Для неспециалистов был яркий результат (нейтроны при лазерном облучении!), но это было в стороне от работ по микровзрыву.

Группа мишеней напряженно работала, обеспечивая мишенями эксперименты на «Дельфине». Порой нашим операторам нужно было поставить 6-8 мишеней в день, а это уже было пределом возможностей наших девушек-операторов. Но мы искренне хотели помочь сотрудникам «Дельфина», в течение нескольких лет работавших на износ. По три-четыре дня в неделю (прихватывая выходные) они настраивали лазер и стреляли, часто по ночам, когда проходящие рядом трамваи уже не сбивали юстировки



Рис. 69. ФИАН 1985 г. в Англии. Слева направо: А.Е. Данилов, А.Г. Молчанов, Л.Д. Михеев, А.И. Никитенко, Ю.А. Захаренков, В.А. Автономов, М.В. Калашников, Г.В. Склизков, А.В. Роде,

Склизкова работают в различных научных центрах мира на постоянной основе.

В начале 80х годов произошло важное (но на мой взгляд роковое) событие. Н.Г. Басов, чтобы усилить работы на «Дельфине» решил закрыть работы на «Кальмаре», сосредоточив всех специалистов на ключевой установке. Я, работавший раньше среди тех, кто эксплуатировал ускорители, ужаснулся. Все установки и большие и малые дают обильный научный продукт, остановка какой-либо установки уменьшает общий

лазера. Я до сих пор не понимаю, как Г.В. Склизкову удавалось воспитывать высокого класса специалистов и поддерживать их энтузиазм на протяжении 10-15 лет. Возможно, всех тонизировало ощущение соревнования с зарубежными лабораториями, и постоянный обмен визитами и работа за рубежом(см. рис. 69). Сейчас около трети научных сотрудников старой лаборатории Г.В.



Рис. 70. А.С. Шиканов



Рис. 71. Ю.А. Захаренков



Рис. 72. А.А. Рупасов

научный выход. «Кальмар» как лазер, в основном, держался на Николае Николаевиче Зореве, хорошем научном работнике со своеобразным характером и Леше Ерохине.

Кроме него и Леши Ерохина некого было брать на сборку и наладку лазера «Дельфин». Остальные сотрудники (руководитель группы Андрей Сергеевич Шиканов см. рис. 70, Юрий Александрович Захаренков см. рис. 71 и Александр Александрович Рупасов см. рис. 72) были

диагносты – специалисты по диагностике плотной плазмы, написавшие с соавторами очень подробную монографию «Диагностика лазерной плазмы» [57].

В то же время я обсуждал с Ю.А. Захаренковым работу по рентгеновским исследованиям плазмы с наночастицами металлов. Он раскопал в отчетах Ливерморской лаборатории США удивительный результат о слабом убывании при уменьшении концентрации золота интенсивности рентгеновского излучения из плазмы от мишени из бериллия с наночастицами золота. Хотя сама интенсивность была почти на порядок выше чем из чистого бериллия. Интересно, что через 30 лет тот же неожиданный результат получила Наталья Глебовна Борисенко с коллегами из Индии на лазере индийского центра BARC (Атомный научный центр им. Баба) от мишеней из малоплотного полимера с и без наночастицами меди.

Похожее трагическое решение принял Н.Г. Басов позже, когда пригласил на работу в ФИАН Льва Петровича Феоктистова, расколов лабораторию Г.В. Склизкова надвое.

Л.П. Феоктистов, конечно, блестящий ученый, но типичный теоретик. Он собрал нескольких своих подчиненных и пригласил меня. Лев Петрович начал излагать грандиозные проекты. А я спросил: «Сколько человек будут реализовывать Ваши планы?» Последовал ответ: «Человек 250». Я сказал: «Вы ошибаетесь, в Вашем подчинении 12 лазерщиков и теоретическая группа В.Б. Розанова. А моя группа работает вообще в другом отделении». Ошибка вышла больше, чем на порядок.

Для группы мишеней очень важным оказался организованный Г.В. Склизковым обмен специалистами (см. рис. 76) по договору о дружбе Отделения квантовой радиофизики ФИАН и Лазерного центра Резерфордской лаборатории Великобритании (такой же многопрофильный научный центр, как ФИАН).

В Англии наши высокоаспектные стеклянные мишени в экспериментах на лазере для сферического облучения «Вулкан» (600 Дж в шести пучках) были сравнены с

мишенями из Японии от группы Т. Норматцу (Университет г. Осака). Оказалось, что наши мишени не хуже японских, и на них был получен нейтронный выход до $5 \cdot 10^9$ нейтронов за лазерную вспышку (выстрел). После этого прекратились обвинения в том, что во всех неудачах на лазерах виноваты мишени. В течение 5 лет сотрудники группы мишеней ФИАН (А.И. Никитенко, А.И. Громов, Е.Р. Корешева и Н.Г. Борисенко) ездили с нашими мишенями на эксперименты на лазер «Вулкан». С английской стороны с мишенями работал



Рис. 73. С. Braun

Сирил Браун (Cyril Braun, см. фотографию на рис. 73), который приезжал в Москву и работал в нашей лаборатории.

Надо сказать, что установка для изготовления стеклянных мишеней была построена в Институте лазерной энергетики Университета г. Осака (ILE) по образу и подобию нашего стенда В-1. В 1984 году в ФИАН была делегация из ILE во главе с директором Т. Яманака, которому показали нашу печку. На следующий год приехал младший С. Яманака, который в течение нескольких часов изучал устройство нашей установки. А уже через 2 года в печати вышла статья японцев с информацией о пуске печи, производящей крупные стеклянные оболочки. Конечно, они сделали все лучше, сделав нагреватель из вольфрама, применив теплоизоляцию из тонкого корундового волокна и создав внутренний канал (диаметром 120 мм и высотой 2метра) из плавленной окиси гафния [55] (см. схему установки на рис. 74).

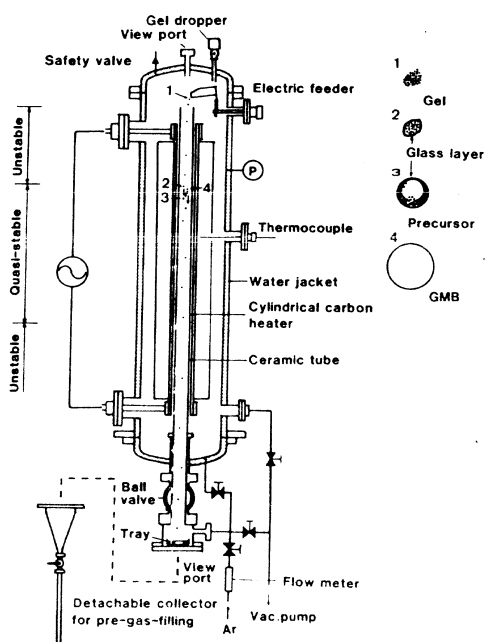


FIGURE 3. Schematic of the vertical furnace for the dried-gel method.

Рис. 74. Схема печи падения для изготовления стеклянных мишеней в Японии

Если бы мы нашли такую трубу, то все равно отдали бы лазерщикам для создания боевых лазеров. В СССР такого размера труб даже из плавленной окиси алюминия не производилось.

Получилось так, что мы могли обеспечивать эксперименты на лазерах с энергией в наносекундной вспышке до 10 кДж при прямом облучении мишеней, производя стеклянные оболочки, заполненные дейтерием. Но нужно было работать с DT-смесью.

Мы попытались использовать опыт ведущих сотрудников в этой области в Москве Е.В. Ершовой и М. Мухамедгалиевой из Всесоюзного научно-исследовательского института неорганических материалов им. А.А. Бочвара (ВНИИНМ), а так же опыт тритиевой установки института Радиационной Генетики Минатома, созданной под руководством В.Н. Мясоедова. Мы с В.С. Бушуевым поняли, что создать в ФИАН (почти в центре города, рядом с универмагом «Москва») установку с радиационным классом №1 нам никто не даст. Поэтому стали рассчитывать на класс 2, но все равно со специальной для трития дозиметрической аппаратурой, санпропускником, душем и пр.



Рис. 75. В.С. Бушуев

Мы заняли комнаты в подвале главного корпуса для работы с открытыми изотопами и запустили тритиевую установку (разработчик Владимир Семенович Бушуев см. рис. 75). В этой установке, которая в аббревиатуре называлась ТУЗ, можно было заполнять стеклянные мишени DT-смесью до давления 5 атмосфер. Проектирование и изготовление установки шло медленно, т.к. В.С. Бушуев увлекался еще созданием чеканных панно и прочими художествами. За это время были изменены правила по технике безопасности при работе с тритием. По первоначальному проекту установка ТУЗ могла содержать до 100 Кюри трития (70 см^3 DT-смеси) и заполнять мишени до давления 50 атм., но после изменения норм только 10 Кюри. С конца 80х годов нам активно помогал Лев Аркадьевич Ривкис из ВНИИНМ. Надо сказать, что через 15 лет нормы опять вернули к прежнему уровню. Пришлось делать установку с внутренним рабочим объемом, содержащим 8 отдельных устройств, всего 1 см^3 . В.С. Бушуев, проявив чудеса изобретательности, сделал уникальную установку с объемом 0.7 см^3 . Но как все художественные натуры, бесконечно отвлекаясь и не доделывая начатое до конца, запустил ТУЗ в эксплуатацию, когда «Дельфин» переставал стрелять. Из-за срыва планов при работе с В.С. Бушуевым в одной связке терпения не хватало ни у кого.

На неправильность моего легкого отношения к вредности трития было указано Министром Минатома (раньше Министерства Среднего машиностроения) Ефимом Павловичем Славским. Дело было так. В середине лета, находясь в отпуске и занимаясь хозяйственной постройкой, я приехал в Москву за какой-то строительной мелочью, и заглянул в ФИАН. Во дворе ФИАН я попался на глаза Николай Геннадиевичу, который поинтересовался, есть ли у меня паспорт. Всю жизнь я носил паспорт с собой. Я ответил, что паспорт со мной. Н.Г. Басов сказал: «Тогда поедешь с нами к Славскому!». А я был одет как рабочий со стройки: рваные кроссовки, старые брюки и потрепанная футболка. Ну, раз надо, то я подождал, пока соберутся товарищи, и сел с ними в машину. Н.Г. Басов взял с собой В.Б. Розанова, Е.Г. Гамалия и меня. Ефим Павлович вышел в комнату своего помощника встречать академика и, увидев бомжа – меня, захотел обматерить (а этим сленгом он пользовался охотно), но взглянул на Н.Г. Басова и с видимым трудом сдержался. В кабинете министра Николай Геннадиевич рассказывал о перспективах термоядерной энергетики. Ефим Павлович, сказал, что если ЛТС позволит сжигать дейтерий с 5% трития, то он будет его сторонником в соревновании с токамаком. В.Б. Розанов ответил, что это невозможно. А я читал в статьях, что возможно, хотя энергия лазера потребуется в 2 раза больше, но и выход во взрыве будет в 2 раза больше. Просто сдвигается порог зажигания. Дошла очередь до меня. Я рассказал, что мы развиваем технологию, где руки операторов при производстве не касаются производимого продукта и легко прошелся по тритиевой проблеме. Тогда Е.П. Славский сказал: «Раньше я был директором комбината, который кроме всего прочего наработывал большое количество трития. Это зараза очень опасная. Ты не видел, как умирают люди от трития!» Потом он переключился и сказал: «Брось ты свои мишени и переходи ко мне заниматься захоронением отработанного ядерного топлива реакторов. Напиши мне страницы 2 своих предложений и передай мне по спецпочте». В течение 2 месяцев я составил предложения, но Н.Г. Басов запретил их передавать Е.П. Славскому.

Стеклянные оболочки во всех лабораториях мира заполнялись DT-смесью методом диффузии газа через стенку оболочки при температуре 550К. При комнатной температуре DT-смесь постепенно вытекала, поэтому мы хранили заполненные мишени в жидком азоте. Микрохолодильники на полупроводниках на эффекте Пелтье мы так и не приспособили, а им еще надо электропитание и водяное или воздушное охлаждение. А так налил азот в сосуд (термос) и можешь идти или ехать куда угодно.



Рис. 76. А.И. Никитенко

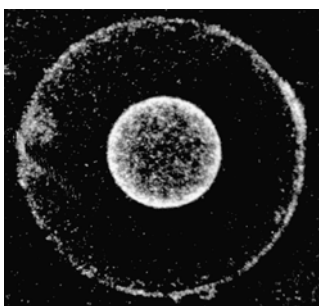


Рис. 77. Рентгеновский снимок каскадной мишени



Рис. 78. Н.Г. Борисенко за лазером для резки полимерных оболочек

За годы до начала 90х по нашей инициативе были выполнены три интересные работы.

Первая работа [52] на лазере «Кальмар» 1979-1981 годов с каскадными мишенями, в которых внешняя тяжелая оболочка, ускорившись, ударяется о внутреннюю оболочку, создавая ей двойную скорость. Андрей Сергеевич Шиканов, руководитель группы, работавшей на лазере, опубликовал эту работу только в 1983 году, когда были готовы теоретики, вошедшие в состав

соавторов. Первую мишень собрал А.И. Никитенко (см. рис. 84) из стеклянных оболочек (внутренняя оболочка диаметром около 100 мкм) и двух половинок полимерной мишени, разрезанной сфокусированным лучом импульсного ультрафиолетового лазера (см. рис. 77). А затем вторую мишень собирала Наталия Глебовна Борисенко (см. рис.78) и далее уже операторы.

Вторая работа [53] была посвящена исследованию на установке «Дельфин» зависимости степени сжатия плазмы из стеклянных мишеней от наличия или отсутствия в стекле наночастиц серебра (об этой работе отдельно будем говорить ниже). Особенно нравилась эта затея нашему соавтору Сергею Ивановичу Федотову (см. фотографию на рис. 79). Основную работу по обработке статистики выполнил Ю.А. Михайлов.

Третья работа [54] также выполнения на лазере «Дельфин» была посвящена устойчивости сжатия высокоаспектных мишеней ($A_s = \Delta R/R \approx 300$, здесь A_s – аспектное отношение, R – радиус оболочки, а ΔR – толщина стенки). Генерировавшая интенсивный рентгеновский поток плазма в центре первоначальной оболочки свидетельствовала о том, что оболочка не распадается на разнообразные струи, как когда-то с жаром утверждал Д. Линдл, а плазма формирует потоки, одновременно сходящиеся к центру (это может впоследствии быть использовано на пользу общему делу!).

Наши высокоаспектные стеклянные мишени, заполненные DT-смесью, применялись в 90х годах в экспериментах с непрямыми мишенями во ВНИИЭФ (г.



Рис. 79. С.И. Федотов

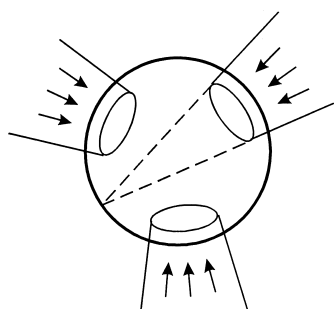


Рис. 80. Схема режима NUHART, но пучков 6

Саров) и в Китае. Но первые опыты за рубежом с прямыми мишенями, содержащими DT-смесь, были выполнены в 1987-1991 годах в Англии в Резерфордской лаборатории на лазерной установке «Вулкан». Постановка эксперимента была необычной. Вместо того, чтобы облучать мелкие (но более толстые) оболочки равномерно, крупная тонкостенная оболочка освещалась так, что на поверхности возникали шесть пятен (по количеству пучков см. схему на рис. 80).

Режим облучения был назван NUHART (NonUniformity High Aspect-Ratio Target). Куски сферической оболочки, превращенные в плазму, толкали перед собой плазму из DT-смеси, которая при столкновении в центре, нагревалась и генерировала 14.3 МэВ нейтроны и 3.5 МэВ α -частицы. В постановке ряда опытов Т. Холл и Г. Роуз использовали мишень как точечный мгновенный источник α -частиц, который применялся для измерения погонной массы плоской плазмы, нагретой и сжатой с

двух сторон излучением еще двух лазерных каналов. Исследовалась возможность существования в плотной (не очень горячей плазме) ближнего порядка атомов алюминия (т.е. кристаллическая плазма). В другом варианте эксперимента точечный мгновенный источник α -частиц применялся для получения данных о РТ неустойчивости. Подготовкой к эксперименту этой комбинации мишеней вместе с нашими сотрудниками занимался местный специалист – Сирел Браун. С группой коллег из Англии (Мартин Лемб, Питер Фьюз и Мора Сэведж), приехавших в Москву, мы договорились о подачи в научный совет, утверждавший программу работ на лазере «Вулкан», нашего предложения о специальной мишени для NUHART из полистирола $(C_8D_8)_n$. Идея заключалась в том, что плазма из содержащего дейтерий полимера даст большее сжатие, которое при разлете даст дополнительный нейтронный выход от взаимодействия с плазмой покоящейся части оболочки. К сожалению, подать данный проект нам не удалось.

7. Хранение водорода в стеклянных микробаллонах при давлении до 2000 атм. Небольшой зигзаг.

В конце 1982 года Н.Г. Басов, Ю.В. Афанасьев и В.Б. Розанов вернулись из поездки в США очень возбужденные (кажется, был еще кто-то менее возбужденный, но я не помню кто). Они привезли информацию о том, что американцы начали работы по хранению водорода в стеклянных микробаллонах (GMB). Этой информацией с ними поделился Т. Хендерсон из KMS-Fusion (не путать с Ч. Хендриксом из LLNL). Им казалось, что это совершенно секретная информация, хотя чуть позже я нашел в специальном отделении ГПНТБ (Государственной научно-технической библиотеки) перечень контрактов на эту разработку и даже некоторые отчеты. Это не было секретом, но это не делало новость менее интересной. Идея такой формы хранения водорода для автомобилей принадлежала одному из разработчиков технологии изготовления стеклянных лазерных мишеней Т. Хендерсон из KMS-Fusion. Н.Г. Басов предложил мне приготовить соображения по развитию работ в этом направлении. Я взялся за оценки (простые расчеты) и литературный поиск, но было тяжело, т.к. Николай Геннадиевич, человек увлекающийся и удивительный оптимист торопил, считая, что можно осчастливить быстро, если не человечество, то нашу страну точно.

А я вырос в семье замечательных инженеров: мать – Галина Васильевна Барбашина, работавшая в Научно-техническом управлении Министерства среднего машиностроения (рано умерла в 1964 году) и отец – Александр Михайлович Меркульев, по специальности металлург, проектировавший автомобильные заводы, например, такие, как завод ВАЗ в г. Тольятти (умер в 1979 году). В семье часто обсуждали производственные вопросы, от отца я знал, что массовое производство автомобилей или комплектующих требует простых инженерных решений и учета всех условий эксплуатации. Хранение водорода для автомобилей требовало ясного представления о том, кто будет производить стеклянные микробаллоны в количестве миллионов кубометров в год, что для нашей страны было невыполнимо. Надо было представлять, как должны работать заправочные станции и сколько будет стоить литр топлива. Надо было решать, что будет оставаться (бензин полностью сгорает). Водород сгорит, а стекло останется. Вставал вопрос «Будем ли мы сдавать посуду?». Если нет, то стоимость неимоверно возрастет. Если сдавать, то какова технология повторного использования микробаллонов.

Я консультировался у М.С. Аслановой в НПО Стекловолокно и у специалистов кафедры стекла МХТИ, а также у ученых из Института металлургии РАН (фамилии их я не привожу, т.к. потерял старые записные книжки).

Работы по водородной энергетике в нашей стране возглавлял Валерий Алексеевич Легасов, один из заместителей директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова. Директором ИАЭ был Анатолий Петрович Александров, в то время бывший также Президентом Академии наук СССР. В.А. Легасов на одном из своих совещаний (маленьких конференций) поставил вопрос о хранении водорода в микробаллонах. Я был приглашен туда случайно, с подачи сотрудников НПО Стекловолокно, испугавшихся этой задачи. Из их микросфер водород вытекал в течение часа. Полые микросферы из щелочного стекла они еще выщелачивали, чтобы исключить растворение стекла в морской воде.

В своей вступительной речи Валерий Алексеевич поставил практическую задачу снабжать топливом прибрежные города и поселки вдоль Северного морского пути. Атомные ледоколы проходят там, в основном, при работе реакторов на 30% мощности, большая часть урана расходуется впустую, на нагрев регулирующих стержней. Если использовать реакторы на мощности 70%, то часть мощности можно пустить на наработку водорода из морской воды. Этот водород нужно, как-то аккумулировать и передать местным жителям для отопления жилищ и производственных нужд. Тогда



Рис. 81. Стекланные микробаллоны с диаметром 150-300 мкм

отпадет необходимость завозить в те недоступные места солярку. Выступали специалисты от ядерных реакторов и химики со схемами оптимального производства водорода, а также ученые предлагавшие хранение водорода в кристатах и хранилищах на основе гидридов металлов.

Дошла очередь до микробаллонов. Владимир Яковлевич из НПО Стекловолокно отказался от слова, предложив послушать меня. У меня был подготовлен краткий доклад с красивыми микрофотографиями мишеней (см. рис. 81), методов их аттестации (характеризации) и с объяснением как происходит заполнение стеклянных оболочек и как возможно извлекать водорода с разрушением микробаллонов и без разрушения. Я привел грубые оценки стоимости производства на Большой земле специальных ГМВ в новых по принципу создания высокой температуры (1800К) в экономичных печах.

Я дал оценку весовых и объемных характеристик метода хранения водорода и привел свое мнение, что давление хранения должно быть не 2000 атм. а 1000 атм. Валерий Алексеевич заметил: «Посуду надо сдавать. Было бы хорошо заполненные микробаллоны в пустых бочках из под солярки сбрасывать в море, проходя на ледоколе мимо поселков, а местные жители на лодках вылавливали бы бочки в море и пользовались». Присутствовавшие эксперты начали обсуждать дальше вопросы переделки котельных и домашнего оборудования для отопления водородом.

Оценки прочности стеклянных микробаллонов GMB (glass microballon) и отрывочные данные о проницаемости водорода приводили к заключению, что надо создавать заново промышленную технологию изготовления со свойствами необходимыми мишеням для термоядерных реакторов. Таким образом, работая над задачей хранения водорода, мы приобретем опыт, который понадобится нам в будущих работах технологией производства мишеней для термоядерного реактора.

Понимая, что группе мишеней с такой сложной программой не справиться, я подготовил от имени директора ФИАН Н.Г. Басова обращение к Президенту АН СССР с просьбой о выделении дополнительно 20 единиц персонала. Станислав Дмитриевич Захаров предложил мне сделать на 1-2 страницах приложение к письму с детализацией решаемых задач. Некоторые мои предложения: по повышению прочности оболочек за счет сверхтонкого внешнего слоя, по управлению проницаемостью оболочек за счет тонкого металлического слоя и пр. были потом реализованы нами с союзниками и американцами, частично в технологии мишеней. Я заметно перебрал, написав 4.5 страницы. Я человек невнимательный и легкомысленный написал в письме «Глубокоуважаемый Александр Павлович!». Наверное, это от волнения. Я отнес письмо с приложением Серафиме Яковлевне, помощнику Николая Геннадиевича и стал ждать.

Через несколько дней раздался звонок от А.И. Исакова, что мы с Н.Г. Басовым и Е.Г. Гамалием срочно едем к А.П. Александрову. Предварительных разговоров с Николаем Геннадиевичем не было. От ФИАН до кабинета Президента АН СССР на машине 5 минут хода. Анатолий Петрович принял нас сразу, ждать не нужно было. Н.Г. Басов передал письмо А.П. Александрову и начал общий разговор о необходимости больше уделять внимания ФИАН, но Анатолий Петрович прервал, предложив дать пояснения по приложению. Тему я назвал Гермес (у римлян Меркурий). Я сел с ним рядом и стал отвечать на вопросы.

Надо сказать, что экзаменатор А.П. Александров был отменный. По каждой из 40-45 позиций на почти 5 страницах он задавал вопросы по наиболее слабой части. Я отвечал минут 30-40. Как мне потом объяснили, это была чудовищная трата государственного времени. Ни один из моих ответов не вызвал возражений. Закончив свои вопросы, Анатолий Петрович снял телефонную трубку, и спросил у В.А. Легасова: «Валерий Алексеевич здесь у меня с Н.Г. Басовым Меркульев из ФИАН с просьбой о помощи. Как вы считаете, надо ли поддержать?» Выслушав мнение В.А. Легасова, А.П. Александров что-то быстро написал на привезенном письме и, повернувшись в Н.Г. Басову сказал: «Николай Геннадиевич, может Вы подпишите письмо?» Н.Г. Басов расписался и Анатолий Петрович, повернувшись ко мне сказал: «Тут половина от того, что ты просил, за второй половиной придешь ко мне через год, когда развернутся работы. Иди к в научно-организационный отдел с бумагами, а мы с товарищами еще поговорим». Я побежал в научно-производственный отдел Академии, в котором раньше был, получая единицы от Е.П. Велихова. Завотделом ткнул пальцем в письмо и грозно спросил: «Как зовут Александрова?» Я ответил: «Анатолий Петрович!» А он: «А у вас что написано!» Я опозорился. Но 10 единиц дали со средней зарплатой работы по военной тематике 135 рублей, вместо 120 рублей и это было большое достижение. 15 рублей в те годы были серьезные деньги. Сейчас покупательная способность рубля в 300-500 раз ниже!

Одну единицу я отдал на общие отделы по решению парткома, а все остальные сравнительно быстро использовал для нашей работы. Мне кажется, что все ждали, что я буду делиться единицами, но я не стал. В следующем году я обратился с просьбой дать вторую половину, но Н.Г. Басов письмо не подписал. Позже Серафима Яковлевна показала мне проект письма Н.Г. Басова с просьбой о выделении единиц по 12 научным направлениям, в котором восьмым стояло хранение водорода. По этой теме штатные единицы могли достаться В.Б. Розанову, который готовил общие энергетические обзоры с использованием водородной энергетики. Мне никто из сотрудников Н.Г. Басова ничего об этом письме не говорил. Чувствовалось, что Николай Геннадиевич считает нас чужими (мы были не из КРФ!).

Я попытался собрать для программы работ по хранению водорода вокруг нашего коллектива хороших экспертов: химиков по стеклу, технологов-печкарей, специалистов по работе с высоким давлением и по водородному охрупчиванию металлов и пр. Познакомился со многими интересными людьми.

Но вдруг все рухнуло. Н.Г. Басов выступил по телевидению (каналов тогда еще было мало) и заявил, что в ФИАН решена проблема хранения водорода в микробаллонах. Мне звонили обиженные специалисты, а я просил прощения, напоминая известный анекдот в котором утверждается, что академики могут говорить все что угодно, а простые ученые имеют право говорить лишь то, что можно доказать.

Американцы в своей программе выполнения исследовательского контракта по хранению водорода шли по простому пути. Они брали промышленные стеклянные микробаллоны GMB фирмы 3M. Надо заметить, специалисты из промышленности США постоянно совершенствовали свои GMB. Поэтому GMB фирмы 3M были на порядок прочнее и обладали на два-три порядка меньшей проницаемостью для водорода. Работающие по контракту о хранении водорода американцы изучали их прочность и проницаемость водорода в стекле. Они получали весовые характеристики продукта и время хранения. **И все!**

Для нас же этот путь был закрыт. Микробаллоны отечественного производства были слабее по прочности на порядок, и водород вытекал из них в течение часа. Пришлось формулировать научную задачу по-своему. Создать лабораторную технологию изготовления микробаллонов с прочностью близкой теоретическому пределу. Обычно прочность всех изделий в $10\div 20$ раз ниже теоретически возможного уровня потому, что на поверхности предметов есть зародыши микротрещины. Только при производстве сверхтонких волокон, если их поверхность защищается тонкой пленкой (замасливается), достигается теоретическая прочность. Такие волокна в огромных количествах используются в химической промышленности при производстве прочных композитных материалов. Второй задачей было подобрать такие стекла, которые давали бы оптимальные временные характеристики при заполнении и извлечении водорода.

Исследования по теме «Гермес» шли с большим трудом, т.к. никакого финансирования по водородной тематике не было предусмотрено. Мы пытались вводить в стеклянные и полимерные частицы вспениватель (например, воду или аммиак), но частицы из высокопрочного промышленного стекла раздувались слабо. А именно при сильном раздувании и сжатии при охлаждении происходит улучшение симметрии оболочек, как показывали теоретические расчеты [101-103]. Мы пытались разработать технологию изготовления прочных оболочек, которые бы долго хранили водород. Такой прочный полимер как ПЭТФ (лавсан) давал несимметричные оболочки.

Вещество для хороших оболочек должно иметь вязкость, которая медленно меняется при изменении температуры (так называемые «длинные» стекла и то же для полимеров). Это свойство есть у полистирола, а у лавсана нет. Мне казалось, что оптимальным топливом были бы именно полимерные оболочки, содержащие водород под давлением. Такое сухое топливо (оболочки, содержавшие бензин или авиационный керосин) разработаны М.С. Велисовой из ГИПХ. Полимерные оболочки при комнатной температуре выпускали водород за несколько часов (полистирольные) до нескольких сотен часов (лавсановые) и должны были храниться в охлажденном состоянии, что для технических применений являлось слабым местом.

Разработанные нами методы и приборы для измерения прочности и проницаемости оболочек оказались полезными для работ с криогенными мишенями. Мы не теряли из вида нашу основную задачу – создание оболочек для термоядерного микровзрыва.

Стекольных составов огромное количество и вести технологические исследования вспенивания различных стекол с набором произвольных составов пришлось бы очень долго. Мы же по имеющейся литературе о сверхпрочных волокнах отобрали составы, дающие наилучшие показатели и ограничились 5-6 составами, получив у наших коллег химиков готовые стекла. Большинство прочных стекол – высокотемпературные. Тут нам и пригодился Стенд В-1. Приходилось работать при температурах 2000К÷2100К. В.М. Дороготовцев с сотрудниками пытался ввести вспениватель в стекло и получить оболочки, но получались лишь шарики с маленькой полостью. Тогда я предложил наполнять эти толстостенные оболочки водородом и, проводя их через горячую зону, добиваться раздувания. Задание мое было выполнено невнимательно, в качестве газа был взят гелий, поэтому раздувание получилось небольшим, т.к. гелий в отличие от водорода вытекает, когда стекло еще не успело дойти до температуры раздувания.

Очень существенным моментом для получения образцов с прочностью близкой к теоретической был определенный процесс защиты поверхности оболочек от соприкосновения с твердой поверхностью или друг с другом. При трении появлялись зародыши микротрещин, снижающие прочность (а значит и уменьшающие предельное внутреннее давление водорода) почти на порядок. Поэтому стеклянные оболочки в печи падения собирались на поверхность из искусственного шелка (состоящего из тонких волокон триацетата целлюлозы) или в силиконовое масло (с низким давлением насыщенных паров т.к. печь была вакуумная). В печи, работавшей при атмосферном давлении, фирмы General Atomics собирали в стакан с водой.



Рис. 82. Вайян Миллер

Именно оболочки из масла дали наибольшую прочность в опытах А.И. Никитенко с сотрудниками, выполнявшими работы по заполнению оболочек водородом и контроль прочности.

Но потом о методе повторного раздувания вспомнили, Валерий Михайлович в 1997 году рассказал о нем Вайяну Миллеру (Wayen Miller, см. рис. 82) из фирмы Дженерал Атомикс (General Atomics) на нашей конференции в Москве. Американцы успешно довели этот метод до практического воплощения на оболочках из обычных силикатных стекол, установив, что каждое повторное вспенивание должно ограничиваться увеличением диаметра оболочки в 1.5 раза. При более бурном раздувании получается существенное искажение формы оболочки.

Второй путь получения стеклянных оболочек, который пытался реализовать В.М. Дороготовцев, заключался в изготовлении исходных гранул из эфиров кремния и других элементов. К сожалению, в СССР в продаже не было этиловых эфиров алюминия и магния. Поэтому единственный продукт, который удалось изготовить, это мелкие оболочки из окиси кремния через растворы тетраэтоксисилана (ТЭОС), получение гранул их кремний аэрогеля. Но кварцевые оболочки производились с очень невысоким выходом. Позже мы познакомились с сотрудниками МГУ, которые получали эфиры в лабораторных количествах, но к тому времени наш энтузиазм в работах по хранению водорода уже кончился.

Первый прибор для заполнения стеклянных оболочек водородом до 1000 атм., работающий как трехступенчатый термомультипликатор помог нам изготовить Николай Николаевич Засавицкий. Подобный прибор для заполнения мишеней дейтерием до 1000 атм. ФИАН поставил в Китай. Сдавал его В.С. Бушуев. Были сделаны установки для заполнения водородом тугоплавких слабо проницаемых микробаллонов из магнийалюмосиликатного стекла, которые заполняли водородом микробаллоны при температуре до 800К и давлении до 10000 атм.

А.И. Никитенко придумал простую демонстрацию наполненных микробаллонов. Под микроскопом с небольшим увеличением на стекло в каплю глицерина клалась заполненная оболочка, которая сверху прижималась выпуклой частью линзы с небольшой кривизной. При некотором нажиме на линзу оболочка лопалась, и образовывался пузырь в 30-40 раз большего диаметра, чем микробаллон. Второй способ демонстрации заключался в фотографировании заполненной оболочки в

гелиевом криостате с оптическими окнами (см. рис. 83). Мы достигли уровня прочности, близкого к теоретическому пределу, нашли стекла с проницаемостью для водорода на 5 порядков ниже проницаемости бутылочного стекла. Свои результаты мы

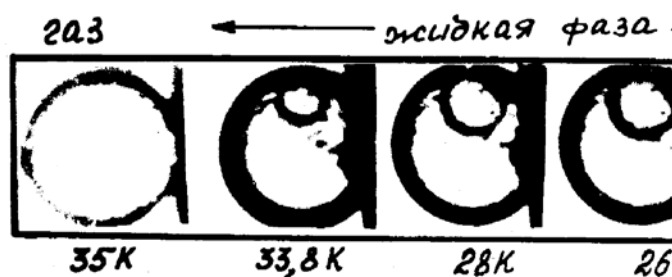


Рис. 83. Стекланный микробаллон, заполненный водородом до 1000 атм. при разных температурах

публиковали в наших и зарубежных журналах, докладывали на международных конгрессах по водородной энергетике. Работы прекратились после Чернобыльской аварии и трагической смерти В.А. Легасова.

Основные выводы из нашего цикла работ по докладу А.И. Никитенко на конгрессе по водородной энергетике в Париже в 1986 году:

1. способ хранения водорода в микробаллонах дорогостоящий;
2. весовые характеристики по сравнению с хранением в криостатах могут быть сопоставимы для дорогостоящих стеклянных микробаллонов, поэтому такой метод хранения может быть конкурентоспособным лишь для дальних космических полетов, но по объему проигрывает криостатам в 2 раза;
3. время хранения водорода в дорогостоящих микробаллонах при комнатной температуре может достигать 10-30 лет, а время хранения водорода в дешевых микробаллонах может достигать 10 лет при температуре хранения ($240\text{K} \div 220\text{K}$);
4. повторное применение микробаллонов не удешевляет использование, т.к. требует повторной тепловой обработки микробаллонов;
5. полномасштабное производство микробаллонов для всей автомобильной промышленности должно превышать по объему нынешний уровень производства дешевых микробаллонов более чем на два порядка.

Мы, как независимые и незаинтересованные эксперты, следим за продолжением работ в разных странах (Франции, России, Китае и Индии) по капсулированию водорода (hydrogen encapsulation) в микробаллонах и микрокапиллярах, но они не изменили наших заключений. Опыт этих работ, связанный с изучением утечки

водорода и измерением прочности при заполнении и хранении водорода при давлении 1000 атм. оказался полезным при работах с криогенными термоядерными мишенями.

8. Технология изготовления термоядерных мишеней для лазеров с энергией до 300 кДж.

В середине 80х годов лаборатория термоядерных мишеней ФИАН представляла собой внушительное (25 единиц) объединение специалистов, занимающихся различными проблемами, связанными с созданием оборудования для изготовления мишеней и аппаратуры для контроля их параметров. В то время нейтронно-физическая лаборатория стала отделом при дирекции ФИАН. Сергей Иванович Никольский шутил, говоря, что у нас лаборатория представляет собой некий свечной заводик, где все от начала и до конца, до выпуска готовой продукции делается внутри. Но надо еще отметить, что мы еще сами производили технологические установки и изготавливали измерительные приборы для контроля. На самом деле эту же мысль выражали в своих проектах американцы, обзывая часть, которая поставляла мишени в фокус лазера

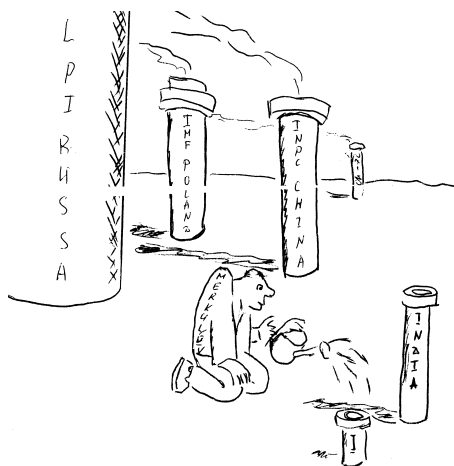


Рис. 84. Дружеский шарж.
Меркульев возделывает огород
из «фабрик мишеней»

«фабрикой мишеней». Позже, когда мы выполнили несколько международных проектов, В.С. Бушуев представил это в виде дружеского шаржа (см. рис. 84).

Действительно, наша лаборатория была одной из 4 лабораторий в мире, в которой был весь набор устройств для производства мишеней и передачи их в эксперимент. Первой назову лабораторию (точнее отдел, т.к. мишенями в 80х годах было занято более 50 человек) мишеней фирмы General Atomics США, тогда во главе с Кеном Шульцем (Ken Schults), второй (а может в те времена первой) являлась лаборатория мишеней Ливерморской лаборатории во главе с Чаком Хендриксом, а затем с Томом Бернатом (Tom Bernet), работавшая в тесном контакте с сотрудниками, включавшем обмен идеями и изделиями с лабораторией мишеней фирмы Шафер Ассошиэйтед (Shafer Associated), третьей была лаборатория мишеней Института Лазерной Инженерии Университета г. Осака в Японии, работавшая под руководством Токаейоши Нориматсу (Takayoshi Norimatsu) и четвертой (или

третьей) была наша лаборатория мишеней ФИАН. Другие крупные, но не полностью укомплектованные, лаборатории мишеней находились: в Институте лазерной энергетики Рочестерского университета США во главе с Хуого Кимом (Huogo Kim) и потом с Давидом Хардингом (David Harding); в Лос-Аламосской лаборатории США во главе с Лари Форманом (Larry Forman); во Франции Филипп Баклет (Philippe Baclet); в Институте физики плазмы в Польше. Лаборатория мишеней фирмы KMS-Fusion в это время была закрыта потому, что фирма перестала вести работы по ЛТС. В нашей стране кроме нас было еще 2 группы мишеней: большая группа, а затем лаборатория во ВНИИЭФ (г. Саров) во главе с Валерием Ивановичем Ципкиным, а позже во главе с Владимиром Михайловичем Изгородиным; и группа во ВНИИТФ (г. Снежинск), которая со временем сошла на нет. Лаборатория во ВНИИЭФ была почти полной, но заполнение DT-смесью проводилось в другом подразделении того же центра, но в установке, не приспособленной к работе с мишенями. Были группы в Англии, Китае и Индии, но их состав начал увеличиваться только в 90х годах. Всего в мире можно было насчитать активно работающих сотрудников лабораторий мишеней 300-350 человек, а с учетом привлекаемых субподрядчиков на порядок больше.

Начиная с середины 80х годов Чак Хендрикс с лидерами других центров начал проводить в США раз в полтора года специализированные конференции по технологии изготовления мишеней. В этих конференциях принимали участие научные сотрудники из стран, участвующих в НАТО (тогда еще с узким набором стран). Нас на эти конференции не допускали до 1994 года, но и позже во время секций с докладами по третию отправляли на экскурсии. Скрывать-то было нечего, в СССР работы с гидридами металлов были на высоком научном уровне.

Ведущие сотрудники лаборатории мишеней (те, кто знал английский язык) ездили с докладами на международные конференции по физике плазмы или ECLIM (европейские конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом) и только там встречались с сотрудниками групп мишеней (в основном, с руководителями лабораторий). Но именно конкуренция на международном уровне активизировала работу сотрудников лаборатории мишеней ФИАН. Режим секретности был и в СССР, и в США. Американские ученые жаловались нам на то, что опубликовать свои работы могут только тогда, когда покажут похожую работу, опубликованную в СССР. До середины 90х годов в Ливерморской лаборатории США считалось, что материалы по стеклянным оболочкам секретные, а по полимерным мишеням открытые. Был еще один канал передачи информации - это встреча с коллегами из Польши. Мы рассказывали

польским ученым о своих работах. Они гораздо чаще и свободней ездили в США, чем мы. Через полгода в США выходили статьи по тем вопросам, по которым у нас были достижения.

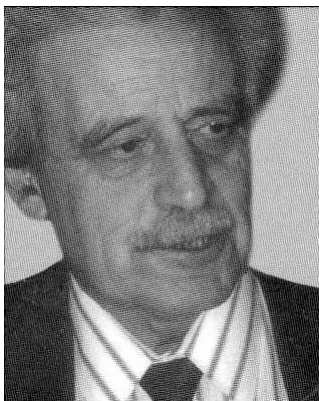


Рис. 85. М.И. Пергамент

Когда в Минатоме начали готовить новую программу по сооружению большого лазера и выбрали головной организацией ТРИНИТИ (филиал ИАЭ им. И.В. Курчатова) в подмосковном городе Троицке, то, естественно, привлекли ФИАН по лазеру, а основным исполнителем по мишеням нашу лабораторию. Готовил эти материалы Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР Михаил Иосифович Пергамент (см. рис. 85), под руководством которого работала однопучковая лазерная установка «Мишень». Однако, плоские мишени для своих экспериментов они делали сами. Нас он знал скорее по докладам на ежегодной конференции по физике плазмы в г. Звенигород. Мы готовили необходимые документы добросовестно, с большой детализацией, т.к. хорошо знали все участки работ. В то время в СССР уже было туго с финансами, да и участники проекта пытались тянуть одеяло на себя, предлагая включить в постановление лазерные системы негодные для ЛТС.

Объяснить отказ СССР от многих гонок престижа было бы нам легко, если бы мы знали о тяжелом экономическом кризисе, в котором находилась наша страна. Постановление не состоялось, но М.И. Пергамент в дальнейшем в других крупных проектах рекомендовал привлекать нас в качестве головной организации по мишеням.



Рис. 86. Б.Н. Ельцын обсуждает с Н.Г. Басовым и другими сотрудниками работы ФИАН (фотография сделана на смотровой площадке «Дельфина»).

Хочется поделиться эпизодом в жизни ФИАН, который произошел в годы, когда бюрократия, как и теперь, требовала от науки практической отдачи. Оборонные предприятия начинали производить эмалированную посуду и т.д. В годы, когда Борис Николаевич Ельцын был секретарем МК КПСС, его позвали в ФИАН. Он приехал, и наш директор Н.Г. Басов со свитой принимал его, показывая в том числе «Дельфин»

(см. рис. 86), но рассказывал в основном про прикладные работы (включая хранение водорода в микробаллонах), которые с точки зрения бывшего строителя, да и с нашей, были не очень впечатляющие. Уже в конце своего почти 4х часового визита Б.Н. Ельцин спросил у Н.Г. Басова: «Николай Геннадиевич, а фундаментальные работы ФИАН ведет?». Предварительная ориентация была неверна! Когда сейчас говорят о важности прикладных работ в Российской академии наук, я, вспоминая ошибку во время визита Б.Н. Ельцина, думаю о том, что основной задачей академических институтов является поддержание в стране высокого уровня знаний, без них и вузовская наука захиреет. Все-таки РАН - это мозги, голова. Правда, Александр Васильевич Суворов говорил, что голову надо держать в холоде. Но он – военный. Дмитрий Владимирович Скобельцын требовал, чтобы в его рабочем кабинете была температура $22.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$.



Рис. 87. В.П. Силин

Виктор Павлович Силин (см. рис 87), который является незаурядной личностью как ученый, и в обычной научно-организационной деятельности большой знаток, выступая на Ученом совете ФИАН в 1989 году, дальновидно предсказал, что в ближайшие годы возникнут большие трудности в нашей жизни и рекомендовал каждому коллективу опубликовать обзоры работ в журналах или Трудах ФИАН. Он говорил, что потом вы сможете легче установить связи с зарубежными коллегами и, опираясь на их помощь, продолжать плодотворно работать. Это выступление меня взволновало, и я договорился со своими сотрудниками о подготовке сборника статей в Трудах ФИАН, а также на Ученом совете ФИАН забронировал за нашим сборником место в списке в издательство «Наука».

Наш сборник с названием «Лазерные термоядерные мишени и сверхпрочные микробаллоны» вышел в 1992 году в издательстве «Наука» под номером 220 (а предыдущий был 127!) и был последним. Перевод этого тома на английский язык, выполненный Натальей Глебовной Борисенко, вышел в США только в 1996 году. Начались лихие девяностые.

Но когда в феврале 1993 года я в составе многочисленной делегации наших ученых посетил Ливерморскую лабораторию США, то оказалось, что при дискуссии в руках американцы держали перевод наших статей, сделанный местными переводчиками. Статьи в Трудах ФИАН оказались очень важными для заключения первого контракта с зарубежными партнерами на разработку уникального оборудования для изготовления

крупных (>2 мм) полимерных оболочек. В первой статье была описана моя идея «баллистической печи», в которой исходная гранула и образующаяся оболочка проходят горячую зону дважды (первый раз вверх, а второй вниз). При этом время нахождения частицы в горячей зоне с высотой 1 метр достигает почти 1 секунды, в то время как в печи падения с той же высотой горячей зоны время нахождения составляет $0.20 \div 0.25$ секунды. Кроме того, вторым преимуществом является то, оболочка находится в состоянии близком к состоянию невесомости, и торможение в газе не так сильно сказывается, как при быстром движении в печи падения. Эта идея пришла тогда, когда я готовил наши предложения в 80х годах для проекта М.И. Пергамента. Надо было каким-то образом добиться увеличения диаметра полимерных оболочек. Оболочки с диаметром 1мм получались хорошо.



Рис. 88. С.А. Старцев

Для того, чтобы подтвердить результаты своих простых расчетов, мы с Сергеем Александровичем Старцевым (см. рис. 88) начали готовить полноценную математическую модель технологии изготовления полимерных оболочек. Эта работа потребовала собрать точные физические константы (и их температурные зависимости): вязкости полимера, коэффициенты диффузии газа вспенивателя в полимере и газов атмосферы печи, вязкости смеси газов в печи падения и т.д.

Для простых расчетов мы обычно довольствуемся константами, оцененными с точностью до двойки. Первые расчеты С.А. Старцева, как правило, не совпадали с моими оценками и, как я был удивлен, когда после нахождения и исправления ошибок, результаты оказывались близкими или совпадающими с моими оценками. Получилось, что я для простых расчетов брал физические константы близкие к точным. Позже расчеты С.А. Старцева дали несколько неожиданных и очень важных и полезных для развития технологии изготовления оболочек результатов.

Надо сказать, что сравнение с экспериментальными результатами было чрезвычайно затруднительно, т.к. В.М. Дороготовцев, проводивший опыты, выказывал полную незаинтересованность в их результате. Он считал, что поскольку за модель расчета было взято предположение о росте пузыря, начиная с одного зародыша, а не множественное зародышеобразование, к которому он склонялся, то сравнение данных опыта с расчетом не имеет смысла. В конце 90х годов я сделал упрощенный расчет для сравнения обоих процессов зародышеобразования, и оказалось, что небольшая разница в зависимости диаметра оболочки от времени, возникает в начале процесса

формирования оболочки, но затем результаты почти совпадают, С физической точки зрения это понятно. Все процессы выделения газа вспенивателя при раздувании оболочки ведут к его быстрой потере на надувание оболочки и истечению в атмосферу печи. Каким образом выделяется газ в полость не очень существенно.

Модель формирования стеклянных оболочек мы не столь долго эксплуатировали, т.к. стеклянные оболочки считались ненужными для больших лазеров. Но в середине 80х годов получили отчеты Ливерморской лаборатории, в которых приводились одномерные расчеты формирования стеклянных мишеней. Оказалось, что модели наши близки, но они считали процесс, начиная с капли раствора силикатов, а мы шли от гранулы из сушеного геля. Капельный метод был хорош тем, что давал мишени определенной массы. Но он не позволял делать крупные стеклянные оболочки. Наш метод изготовления из кусочков сушеного геля силикатов давал большой разброс. Это В.М. Дороготовцев с сотрудниками ощутили на себе, когда они выполняли французский контракт на поставку счетного количества стеклянных мишеней, по 5 групп оболочек с очень узким разбросом по массам. На изготовление 40 мишеней ушло полгода, группа ничем другим не занималась и работала по 2 смены каждый день.

Стало понятно, что надо делать калиброванные по массе крупные гранулы гелей щелочных силикатов. Мы решили пойти на трех или четырех стадийный процесс. Используя капельницу для крупных капель, подсушивать их слегка при падении в высокой трубе, заполненной теплым гелием, и собирать капли с замораживанием в жидком азоте. На второй стадии замороженные капли длительно сушатся в вакууме при низкой температуре, но гораздо более высокой, чем температура жидкого азота. На третьей стадии гранулы в высокотемпературной вакуумной печи превращаются в стеклянные оболочки. Надо сказать, что при формировании оболочек в печи при температуре 1900К÷1950К заметная часть щелочей испаряется. На четвертой стадии (если она вообще используется) отобранные оболочки-мишени, наполненные водородом или гелием в зависимости от того тоньше или толще надо иметь мишени проводятся через печь с защитой поверхности для повышения прочности. При применении последней стадии оболочка с аспектным отношением 50 может выдерживать внутреннее давление DT-смеси до 1000 атм., что очень важно для работы с криогенными мишенями. Аналогичное предложение собирать капли щелочных силикатов в жидкий азот и подвергать их вакуумной сушке при пониженных температурах возникло одновременно и у Чака Хендрикса. Наверняка существует Ноосфера Земли!

9. DT-смесь в виде твердого слоя на внутренней поверхности оболочки - криогенные мишени.

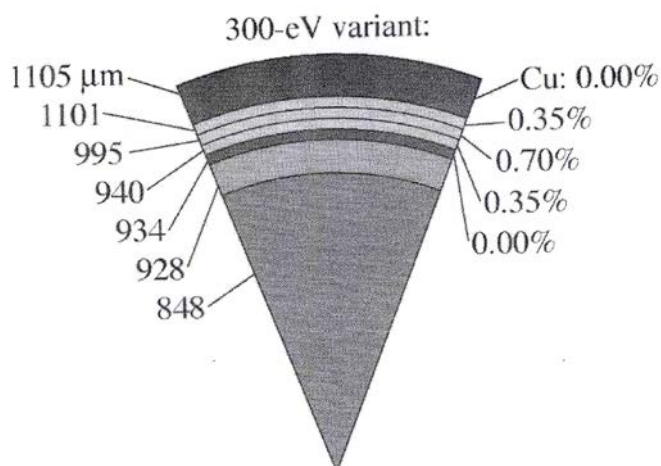


Рис. 89. Схемы мишени из бериллия для установки NIF. Показаны справа диаметры различных слоев в мкм и слева % меди. Внутри DT-газ и внутренний слой DT-льда. Точность изготовления и шероховатость внешней и внутренней поверхности около 50 нм. криогенного слоя 0.5 мкм

На рисунке 89 изображена схема криогенной лазерной термоядерной мишени. Требования к оболочке довольно жесткие: вещество должно состоять из легких элементов; сферичность - вариации радиуса в зависимости от угла не должны превышать 0.05%; разнотолщинность в зависимости от пространственной моды поверхности не должна быть выше 0.003% ÷ 0.01% (большее значение для первых мод); шероховатость внутренней и внешней поверхности не должна быть выше 20

нм для полистирола и 50 нм для бериллия. Надо обратить внимание на то, что слой твердой DT-смеси толстый, т.е. начальное давление газа в оболочке при комнатной температуре должно быть на уровне 1000 атм. Кроме этого требования к слою DT следующие: разнотолщинность не должна быть выше 0.5%; в слое должны отсутствовать микропустоты; шероховатость внутренней поверхности не должна быть выше 0.5 мкм (для мишени с диаметром от 1мм до 2 мм). Требования настолько тяжелые, что кажутся невыполнимыми. Но специалисты, начавшие работы 35 лет тому назад, успели втянуться в работу и привыкнуть к тому, что теоретические требования к мишеням становятся тяжелее в 2 раза раз в 5-7 лет. Все начинали свои разработки, не ощущая груза ответственности (требования казались легко выполнимыми).

Выпускница МГУ по криогенной кафедре Елена Ростиславовна Рычкова (позднее взявшая фамилию Корешева) пришла на работу в группу мишеней в 1974 году (см. фотографию на рис. 100). В первый год работы Е.Р. Рычкова приняла участие в наших демонстрациях шариков из водорода на платиновых нитях, и вошла соавтором в первую нашу статью по мишеням в журнале Квантовая электроника 1975 года. В этом же номере журнала напечатана ее короткая заметка о креплении стеклянных мишеней на сверхтонкой нити из резинового клея.



Рис. 90. Е.Р. Коршева



Рис. 91. А.И.
Никитенко



Рис. 92. И.В.
Александрова

Первые лазерные эксперименты по сферическому облучению стеклянных мишеней, имевших слой замороженной DT-смеси, были проведены в фирме KMS-Fusion США на двухпучковой установке с эллиптическими зеркалами. Фактически вся небольшая камера взаимодействия находилась внутри гелиевого криостата. Нейтронный выход получился почти в тысячу раз меньше, чем от газом наполненной мишени. Теоретики сказали, что так и должно быть для маленьких мишеней. Но все равно было обидно, столько трудов и изящной работы, а результат фактически ноль. Так с криогенными мишенями почти до сих пор.

Проявляя инициативу и настойчивость, Елена Ростиславовна постепенно собрала вокруг себя группу единомышленников и оборудование: гелиевый криостат с сапфировыми окнами для оптических наблюдений, приборы для заполнения дейтерием стеклянных и полимерных оболочек и дополнительную измерительную аппаратуру. Оболочки были маленькие, поэтому для наблюдений за слоями дейтерия в них перед окном криостата ставился объектив для переноса изображения, а уже затем микроскоп. Надо сказать, что большую помощь в этой работе ей оказал Андрей Иванович Никитенко (см. рис. 91).

Среди единомышленников Е.Р. Коршевой надо выделить Ирину Владимировну Александрову (см. фотографию рис. 92), работавшую раньше в лаборатории Г.В. Склизкова. И.В. Александрова получила хорошее образование (МГУ) и научилась в ФИАН азартно работать, сохраняя при этом спокойствие и выдержку. Анатолий Васильевич Антонов, хорошо знавший ФИАН, заявлял, что в группе Меркульева работают самые красивые девушки института, и при этом выделял Ирину Владимировну.

С самого начала работ было принято решение вводить голую криогенную мишень в фокус лазера в камере взаимодействия сверху по трубке, охлаждаемой жидким гелием. Фактически было свободное падение. И стрельба по летящей мишени должна была напоминать стрельбу по летящим тарелочкам на полигоне. Считалось, что крепление мишени к игле будет создавать возмущение теплового поля при быстром замораживании криогенного слоя дейтерия. Кроме того мы не представляли себе как приклеить к игле заполненную и охлажденную мишень. Условия работы в ФИАН (почти центр города) исключали возможность работы с DT-смесью при давлении 1000 атм., поэтому работы велись с дейтерием или водородом. Первые опыты быстрого замораживания водорода в мелких (200 мкм) стеклянных оболочках давали более менее удовлетворительные результаты и мы не предполагали, что в уже недалеком будущем столкнемся с очень большими трудностями.

Переход к работе с крупными стеклянными и, особенно, с полимерными мишенями существенно усложнил задачу получения равномерного слоя. Решая сферически симметричную задачу теплопереноса при замораживании слоя дейтерия в оболочке, приходим к естественному выводу, что время замораживания увеличивается с увеличением радиуса оболочки. Масса замораживаемого газа пропорциональна объему, а теплопередача пропорциональна поверхности. Отношение объема к поверхности для сферы пропорционально радиусу. Теплопроводность полимера почти на порядок меньше, чем у стекла. Кроме того, плотность полимера в 2.5 раза меньше, чем у стекла, поэтому при равной массе оболочек толщина стенки полимерной мишени заметно больше. Таким образом, получается, что время вымораживания дейтерия в полимерной оболочке в 30 раз больше.

На опыте Елена Ростиславовна убедилась, что чем меньше скорость охлаждения, тем хуже получается структура слоя дейтерия или водорода. Получались слои с очень крупными кристаллами. Но появилась надежда, американцы применили нагрев мишени (потом даже только газа) излучением инфракрасного импульсного лазера, что резко сократило время вымораживания DT-слоя. Е.Р. Корешева занялась опытами по увеличению скорости охлаждения. При этом она развивала новую идею. Подобно практики скоростной закалки аморфных сплавов металлов, Елена Ростиславовна с сотрудниками искала газовые добавки, позволяющие получать мелкокристаллическую структуру или даже аморфную дейтерия. Для доказательства изменения кристаллической структуры требовались специальные рентгеновские измерения с плоскими образцами, а это требовало нового оборудования и заметных финансовых

вливаний. Это расширение работ мы позволить себе не могли. Но зато Е.Р. Корешева с сотрудниками стала получать косвенные доказательства правоты своих выводов о новой структуре твердого водорода, дейтерия и их смесей, изучая время и температуру перекристаллизации своих образцов.

В начале 80х годов я уговорил Глеба Владимировича Склизкова выделить деньги на хоздоговор с НПО Красная звезда на конструирование узла ввода криогенных мишеней в камеру взаимодействия установки «Дельфин». Мы с Г.В. Склизковым и Е.Р. Корешевой, заручившись письмом от Н.Г. Басова, поехали на прием к генеральному директору НПО Красная звезда Георгию Михайловичу Грязнову, который с интересом нас выслушал и передал нас своим конструкторам с благословением. Руководителем конструкторов, работавших с Е.Р. Корешевой, был назначен Г.М. Грязновым Г.М. Минеев, а потом эту работу вела та же группа конструкторов во главе с Г.Д. Барановым. Работа выполнялась в течение 5 лет, и закончилась сдачей чертежей уже тогда, когда «Дельфин» исчерпал свой ресурс.



Рис. 93. Huogo Kim from LLE Rochester University.

Руководитель группы мишеней из Рочестера Хуого Ким (см. рис. 93, начиная с 70х годов, присылал мне письма с предложением приехать в США для посещения их группы мишеней. Но я лишь изредка ездил на международные конференции и лишь на серьезные мероприятия с переводчиком, т.к. английский язык я знаю плохо, особенно, разговорный. Поэтому я посылал за рубеж сотрудников хорошо знающих английский язык. Хуого Ким приглашал и моих сотрудников. На одной из конференций доклад Е.Р. Корешевой произвел хорошее впечатление на Роберта МакКрори (Robert McCrogy, см. рис. 94), руководителя исследований на лазерной установке «Омега», тогда еще только готовящаяся к надстройке, которая увеличила ее энергию в импульсе в 10 раз (Omega Upgrade). Эта установка до сих пор остается самой интересной для нас, т.к. она построена для прямого облучения мишеней. Предложения Е.Р. Корешевой гораздо больше подходят для прямого облучения, чем для установок с непрямым (рентгеновским) облучением мишеней.

Роберт подтвердил приглашение Хуого Кима и Елена Ростиславовна Корешева с Ириной Владимировной Александровой поехали в Рочестер. Р. МакКрори к приезду наших экспертов приурочил двухдневное рабочее совещание, на котором были заслушаны подробные доклады – предложения по сооружению оборудования для работы с криогенными мишенями на установке “Omega Upgrade” от фирмы General Atomics из Сан-Диего США и от ФИАН с НПО Красной звездой. По словам Е.Р. Корешевой в сравнении конструкции выглядели как слон и овечка. С моей точки зрения, слабым местом в предложении Е.Р. Корешевой было отсутствие описания оборудования по работе с тритием. Заказ на проектирование и изготовление оборудования достался американской стороне. Институт лазерной энергетики Университета г. Рочестера вложил в этот проект более 30 млн. долларов за только криогенную часть, а потом еще около 10 млн. долларов за тритиевую часть с замкнутой системой очистки откачиваемых из камеры газов и возврата трития.

Авторитет в мире группы криогенных мишеней был и остается высоким. В середине 90х годов проекты Е.Р. Корешевой с коллегами из НПО Красная звезда и ряда

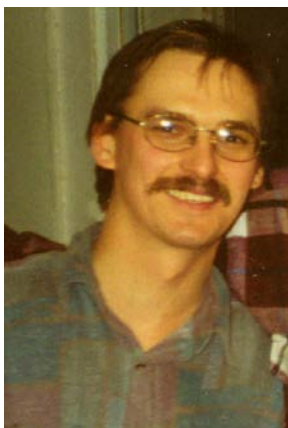


Рис. 95. И.Е. Осипов

московских институтов были приняты в МНТЦ с поддержкой партнеров из США, Франции и Японии. Выполнение этих проектов привело к созданию уникального аппаратного комплекса для работы с криогенными полистирольными мишенями. Елена Ростиславовна Корешева и Игорь Евгеньевич Осипов (см. рис. 95) использовали идею кассеты, предложенной ранее В.С. Бушуевым, в которой происходит заполнение мишеней до высокого давления и медленное охлаждение объема кассеты до криогенных температур. У В.С. Бушуева,

кассета составляла единое целое с оптическим криостатом для наблюдения мишеней, омываемых жидким гелием. Существенным изменением принципа установки Бушуева было то, кассета была транспортным сосудом, который заполнялся в одном аппарате, закрывался и транспортировался в другое помещение (другой институт и т.д.). Кассета устанавливалась в специальном гелиевом криостате и охлаждалась до температур, при которых мишени уже не лопаются под действием внутреннего давления. Кассета открывалась, и мишени поштучно поступали в охлажденный (до $5 \div 7\text{K}$) спиральный канал формиратель равномерного слоя, в котором мишень, которая катится под действием собственного веса, фотографировалась в момент вылета из канала. Все замороженные мишени собирались в поле зрения микроскопа, который затем был



Рис. 96. С.М. Толоконников



Рис. 97. L. Forman

переделан в оптический томограф. Томограф позволял получать трехмерное изображение мишени с замороженным внутренним слоем. В создании этого томографа принимали участие И.Е. Осипов, А.И. Никитенко и С.М. Толоконников (см. рис. 96). Андрей Иванович Никитенко написал компьютерные программы для томографа, которыми впоследствии воспользовались Т. Нориматцу с сотрудниками.

Работая с DT-смесью в полимерных мишенях, Лари Форман (см. рис. 97), с сотрудниками обнаружил, что в крупных мишенях неравномерный твердый криогенный слой за счет поверхностной диффузии изотопов водорода и переноса через газовую среду выравнивается под действием выделения тепла при β -распаде трития. В толстой части слоя температура незначительно возрастает, что приводит к переходу части DT-смеси в холодную тонкую часть.

В процессе исследований Е.Р. Корешева с сотрудниками обнаружила, что под действием вибрации кристаллическое строение внутреннего слоя водорода меняется. Размеры кристаллитов существенно уменьшаются. Формировались слои, которые не претерпевали переход в крупнокристаллическую структуру до температуры 14-15К, тогда как обычные слои переходили в такое состояние при температуре 9-10К. Теоретические расчеты режимов сжатия и зажигания мишеней от малой горячей зоны в центре оболочки, выполненные у нас и в США, показывали на разные начальные условия лазерного облучения мишеней. Ограничение по начальной температуре мишени, возникало из-за массы насыщенных паров DT-смеси. По расчетам наших теоретиков начальная масса становится слишком большой, снижающей эффективность мишени уже при температуре криогенного слоя 12-14К. Тогда как по расчетам теоретиков США начальная масса газа может быть в 30-50 раз больше, т.е. температура криогенного слоя может достигать 19-20К. Неспециалисту различие кажется несущественным, а технологи говорят о радикально различных условиях хранения и доставки в фокус лазера криогенных мишеней.

Лазерных экспериментов с криогенными мишенями очень немного и основные выполнены в Японии на установке Gekko-XII в Институте лазерной инженерии

Университета г. Осако и в США на установке Omega в Институте лазерной энергетики Университета Г. Рочестер. Выход нейтронов в этих экспериментах почти в 10^4 - 10^5 раз уступал нейтронному выходу в опытах с газовыми стеклянными мишенями. Основными достижениями считались данные о плотности DT-плазмы. Оказалось, что она находится на уровне около 100 г/см^3 , тогда как мы помним, что для горения DT-смеси нужна плотность 200 г/см^3 . То, что плотность в 2 раза меньше, означает, что давление в центре мишени было почти в 10 раз меньше расчетного из-за развития гидродинамических неустойчивостей.

В 1988 году Л.Р. Форман и Дж.К. Хоффер опубликовали свою идею удержания равномерного криогенного слоя DT-смеси на внутренней стенке оболочки за счет малоплотной полимерной пены с открытыми порами, названной в последствии «влажной пеной» (wetted foam). Надо отметить, что часть экспериментов на лазере Omega была выполнена с криогенными мишенями, представляющими собой оболочку из полимерной пены, наполненной жидкой DT-смесью и затем замороженной. Результаты с новым типом мишеней оказались лучше, чем с полистирольными оболочкам с криогенным слоем.

Коллектив во главе с Е.Р. Корешевой в составе почти 25 человек из разных организаций Москвы и Питера вел успешные работы в течение 10 лет. Потом были выполнены важные работы по международным европейским проектам HED&NOP и HiPER. Около 10 лет тому назад в зарубежных лабораториях начались работы с криогенными мишенями, содержащими конус для быстрого зажигания (fast ignition). Такая конструкция мишени нам показалась бесперспективной. Сначала бороться за сверх симметричную мишень, потом ее просверлить и вставить в нее конус, сформировать криогенный слой и слепо верить в то, что сжатая в центре плазма будет столь же плотной, как и в мишени без конуса! Невероятно! Остается надеяться на то, что режим fast ignition реализуется при дополнительном к общему сферическому облучению внешнем ударе последовательности двух мощных коротких лазерных импульсов длительностью 50 пс и 5 пс. Такой режим пытается реализовать коллектив во главе с Робертом МакКрори из Рочестера на установке «Омега».

Я уверен, что более подробно и интересно о своих работах расскажет в своих воспоминаниях Елена Ростиславовна Корешева, обладающая поэтическим и литературным даром.

10. Контракты с зарубежными научными центрами и наши конференции.

Незаметно надвигавшийся экономический кризис в СССР привел к национальной катастрофе, к распаду страны на фрагменты разного размера. Мы были поставлены в условия голода, когда еще шок от Е.Т. Гайдара привел тому, что и девальвированными деньгами пользоваться было нельзя. Тогда на почти труп слетелись вороны. США приняло решение за небольшие деньги откачать из нашей страны те знания, которыми они не обладали. Одна из таких акций, прошедшая в два этапа, существенно повлияла на нашу жизнь. Делегации из научных лабораторий США ездили в 1991 году по разным городам и предлагали показать оборудование и за небольшие деньги написать подробные отчеты (5\$ за страницу). Делегация, посетившая ФИАН (и ВНИИЭФ г. Саров, и ВНИИТФ г. Снежинск), состояла из высших специалистов Ливерморской национальной лаборатории, где уже работала лазерная установка «Шива» и строилась установка «Нова» (обе для непрямого облучения мишеней). В два захода, сначала



Рис. 98. Е.М. Campbell

знакомство с уровнем выполняемых работ, руководил делегацией из США Эрик Сторм, и потом для обсуждения условий контактов, руководил делегацией Майкл Кэмпбелл (см. рис. 98). Оба лидера из США нашим специалистам были хорошо знакомы по международным конференциям и визитам в США. Во время обоих визитов переводил от США Кусубов (к сожалению, забыл его имя и отчество, советский гражданин, сбежавший в штаты каким-то лихим способом на лодке в скандинавские страны). Он не только греб хорошо, но и блестяще владел английским языком.

Заранее предупрежу, что через И.В. Александрову Эрик Сторм узнал, что мишенная лаборатория подчиняется А.И. Исакову, а не непосредственно Н.Г. Басову. Поэтому на все заседания приглашали А.И. Исакова со мной. Оканчивая визит в ФИАН, Эрик Сторм рассказал о заранее запланированных контрактах. На ФИАН приходилось 24 контракта, из них по технологии изготовления мишеней 4 отчета и 2 контракта - поставка образцов мишеней. Н.Г. Басов заявил, что Меркульев пусть занимается поставкой образцов, а 4 обзора напишут сотрудники КРФ (Все таки мы все время были для него чужими).

Э. Сторм промолчал, но когда выходили из кабинета Н.Г. Басова, предложил мне поехать на их машине в Президиум РАН (новое красивое здание). В комнате для переговоров Э. Сторм объяснил мне на какие темы наши отчеты. Оказывается расценки (5\$ за страницу на английском через один интервал) утвердило Министерство иностранных дел России (Спасибо Козыреву, интересно, сколько у них стоит перевод 50 страниц, 12 буклей, через 1 интервал?). Каждый отчет 50 страниц, т.е. по 2.5 k\$. Перейдя к контрактам о поставках образцов мишеней (отдельно стеклянных и отдельно полистирольных), Э. Сторм заявил, что они по той же цене, что и отчеты. При этом в каждой поставке по 50 мишеней! Я возразил, сказав, что изготовление мишеней процесс трудоемкий, в котором занято много специалистов разного профиля. Я увидел,



Рис. 99. Robert Cook

как на лице Кусубова мелькнула довольная улыбка. Эрик стал рыться в документах и, наконец, наткнулся на короткую записку, подписанную крупно Кук (Cook, см. рис. 99). Текст на чужом языке я читаю медленно, но цифру 5000\$ я рассмотрел сразу. Э. Сторм закрыл документы и объявил мне, что американская сторона согласна на 5 k\$ за каждый тип мишеней. Впервые в жизни я за полчаса разговоров заработал 5000\$!

На следующий день в той же комнате для переговоров Президиума состоялось утверждение списка контактов. Я был под защитой А.И. Исакова, которому не пришлось особенно выступать. Когда Э. Сторм дошел до 6 контрактов по мишеням, Н.Г. Басов возмутился, покраснел и готов



Рис. 100. А.В. Веселов

был взорваться, но нашелся Кусубов. Он начал быстро говорить, что американская сторона нашла возможность добавить к контрактам еще 3000 долларов для поездки Н.Г. Басова в США. Николай Геннадиевич отвлекся и быстро остыл. По мишеням был в России заключен всего еще один контракт на написание отчета о сортировке стеклянных оболочек по диаметрам в жидкости при движении сквозь калиброванные щели (разработчик Алексей Викторович Веселов из ВНИИЭФ г. Саров, см. рис. 100). **И это все!**

Перестройка экономики сильно ударила по нашей лаборатории, в 1990 году в строительный бизнес ушел Андрей Иванович Никитенко. Но именно контракты с США позволили сохранить основной состав лаборатории мишеней.

Тематика 4 отчетов была следующая: 1- о технологии изготовления полимерных оболочек; 2- о технологии изготовления стеклянных мишеней; 3- о сверхпрочных микробаллонах; 4- о работах с криогенными мишенями. К весне 1993 года мы

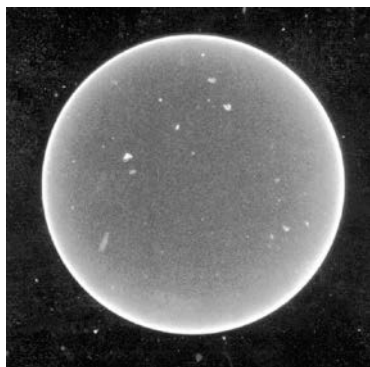


Рис. 101. Фотография полистирольной оболочки в рентгеновских лучах.

выполнили обязательства перед Ливермором. И я получил электронное письмо от Боба Кука, в котором он писал, что впервые в жизни видел такие крупные и такие хорошие полистирольные оболочки. Я поздравил В.М. Дороготовцева с коллегами. Чуть позже В. Соок прислал отчет об измерении параметров «русских» полимерных оболочек и 4π измерение шероховатости, который потом вышел в качестве статьи в ежемесячном журнале LLNL. Оказалось, что, не смотря на общую хорошую симметрию, на оболочках было много пыли, возможно, из-за почтовой доставки (см. рис. 101)

Две делегации по 150 человек были приглашены в Ливермор для докладов по отчетам. Разбивка на 2 делегации облегчила им размещение и обслуживание иностранцев. ФИАН попал во вторую делегацию. От нашего института было 4 представителя из КРФ и 4 из Нейронно-физического отдела ФИАН. В нашем составе были Алексей Иванович Исаков, я, Игорь Евгеньевич Осипов и Сергей Михайлович Толоконников.

В первый день посещения Ливерморской лаборатории Майкл Кэмпбелл – руководитель работ по лазерным исследованиям, представляя мне Роберта Кука (Robert C. Cook), сказал, что ради знакомства со мной тот впервые в жизни надел галстук, а обычно Боб работает с 8 утра до 8 вечера. В первый же день состоялось пленарное заседание вне площадки, на котором были обоюдные приветствия и рассматривались лишь организационные вопросы, затем была экскурсия на лазер «Нова». Потом все разошлись по разным подразделениям, которые разбросаны по огромной территории этого научного центра. Центр усиленно охраняется, несколько рядов колючей проволоки и видео наблюдение. Каждому из гостей выдали карточку – временный пропуск.

В рабочие комнаты лаборатории мишеней нас не пускали, мы могли находиться лишь в зале заседаний лаборатории мишеней. Если нужно было пройти в туалет, то пройти можно было в сопровождении охраны. При выходе из зала на диване полулежала с пистолетом девушка - негритянка с закрытыми глазами. Когда кто-то из нас появлялся, один глаз ее просыпался, и она нехотя провожала вас в туалет и обратно.



Рис. 102. Т. Бернат

Мини конференцию по мишеням проводил Том Бернат (см. рис. 102), руководитель лаборатории мишеней LLNL. Выступали по очереди мы и американцы, каждый доклад минут по 40 и потом многочисленные вопросы. Поскольку встречались узкие специалисты, то и конкретных вопросов было много. Нам американская сторона предоставила переводчика - синхрониста – молодого парня, блестяще владевшего русским языком. Лицо у парня простое, немного деревенское, отличить его от русского почти невозможно, разве только лицо квадратное, наши то лица все округлые. Я впервые в жизни видел так сильно волнующихся выступавших из числа хозяев. Потом оказалось, что у около половины сотрудников лаборатории заканчивались временные трехлетние контракты, и коллеги волновались, боясь потерять рабочее место и хорошую зарплату.

Все соотечественники, кто смотрит телевизор и слушают юмориста Задорнова о тупых американцах, очень сильно удивятся, узнав от меня, что все американские ученые и специалисты много работают, имеют блестящее образование (даже химики хорошо знают высшую математику) и общую культуру. Около 30% в юности окончили музыкальную школу. Около 20% старшего поколения учили русский язык и немного им владеют. Многие зарубежные ученые хорошо разбираются в русской литературе. Когда мы встречали коллег из США, проводя свою первую международную конференцию по мишенной тематике в 1997 году, мои коллеги говорили мне, что приехали делегаты моего возраста. А я, который оформлял через МИД приглашения каждому иностранцу, объяснял им, что делегаты в их возрасте, и у них вид замученный из-за того, что они работают на износ, пытаюсь быть в работе первыми.

Я делал три доклада по технологии полых микросфер (стеклянных, полимерных и сверхпрочных), и один доклад делал Игорь Евгеньевич Осипов по криогенным мишеням. Прошло много лет, и вспомнить, кто из американских коллег выступал, я не могу.

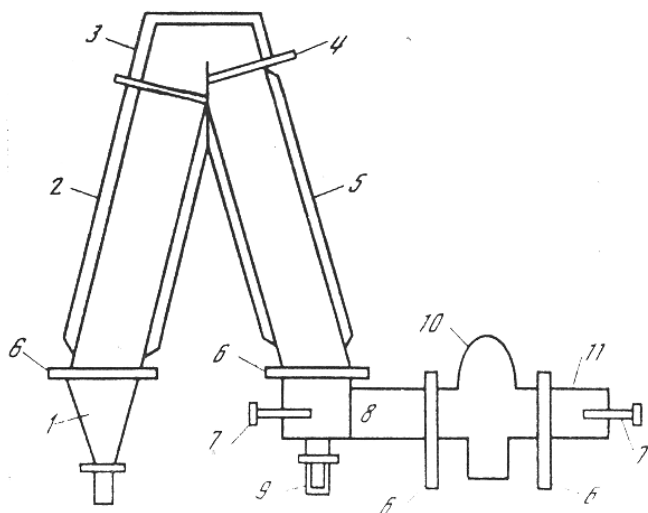


Рис. 103. Схема технологической линии с баллистической печкой: 1 - инжектор исходных полимерных гранул, 2.- нагреватель, 3 - зона стабилизации, 4 -быстрый затвор, 5 - зона охлаждения, 6 - вакуумные клапаны, 7 - манипулятор, 8 - модуль сортировки, отбора и выгрузки, 9 - модуль для заполнения мишеней газом, 10 - модель для нанесения внешних слоев, 11 - вакуумный шлюз.

Помню только, что идея создания баллистической печи, изложенная в нашей статье в Трудах ФИАН, т. 220 (см. рис. 103), была встречена с интересом и вызвала у Тома Бенета множество конкретных вопросов, я быстро отвечал, не замечая, что мы говорим на разных языках. Таков был наш переводчик, но вечером он все же упал в обморок от переутомления. К обеду третьего дня работы, нам объявили, что американская сторона хотела бы заключить с нами трехлетний контракт на сумму 100 тысяч долларов на создание баллистической печи и демонстрацию технологии изготовления крупных 2 мм

оболочек из полистирола. Заказчиком выступал Боб Кук. По американским законам военные лаборатории не могут покупать и работать на зарубежном оборудовании, они должны получать чертежи, переделывать их под свой стандарт, и изготавливать у себя.

Я попросил принести типовой контракт. Оказалось, что текст контракта почти полностью повторяет стандартный текст нашего хоздоговора. Поэтому я попросил всех сходить пообедать, а мы с Бобом за это время напишем условия контракта. К возвращению наших коллег с обеда, мы уже имели рукописный контракт, который отдали в печать. А.И. Исаков был заместителем директора ФИАН и подписал заявку на контракт (Order). С американской стороны контракт был подписан главным экономистом Ливерморской лаборатории. Мы были единственной группой из всей российской делегации, которая уезжала с готовым контрактом. Некоторые из членов российской делегации уезжали с протоколами о намерении заключить контракт, а многие вообще без контактов. Через 3 месяца после обмена документами с LLNL по почте Federal Express были подписаны все документы и многочисленные приложения к контакту, и он вступил в силу.

В отличие от наших внутренних договоров по американскому контракту надо отчитываться ежеквартально. Столько отчетов, сколько было по этому контракту, я наверное за всю предыдущую жизнь (33 года работы) не написал, не говоря еще, что все на английском языке. А.И. Никитенко с коллегами за 2 года была создана установка и испытана технология изготовления 2 мм полистирольных оболочек (см. рис. 94) Хорошо еще, что в 90ые годы законодательство не требовало много документов при официальной отправке отчетов или образцов оболочек. Нужно было всего 5 документов с подписями и печатями (кроме паспорта сделки), в 2002 году при отправке печи падения для изготовления стеклянных микробаллонов в Индию от нас уже требовалось 17 документов.

По закону сохранения, который сформулировал Гурген Ашотович Аскарьян – **количество дерма не убывает**. Следствием этого закона является то, число бюрократов не убывает, число разрешительных документов не убывает. Убывает лишь число ученых и количество денег на науку.

Ballistic furnace for large (2 mm) polymer shells, created by LPI for LLNL (USA)

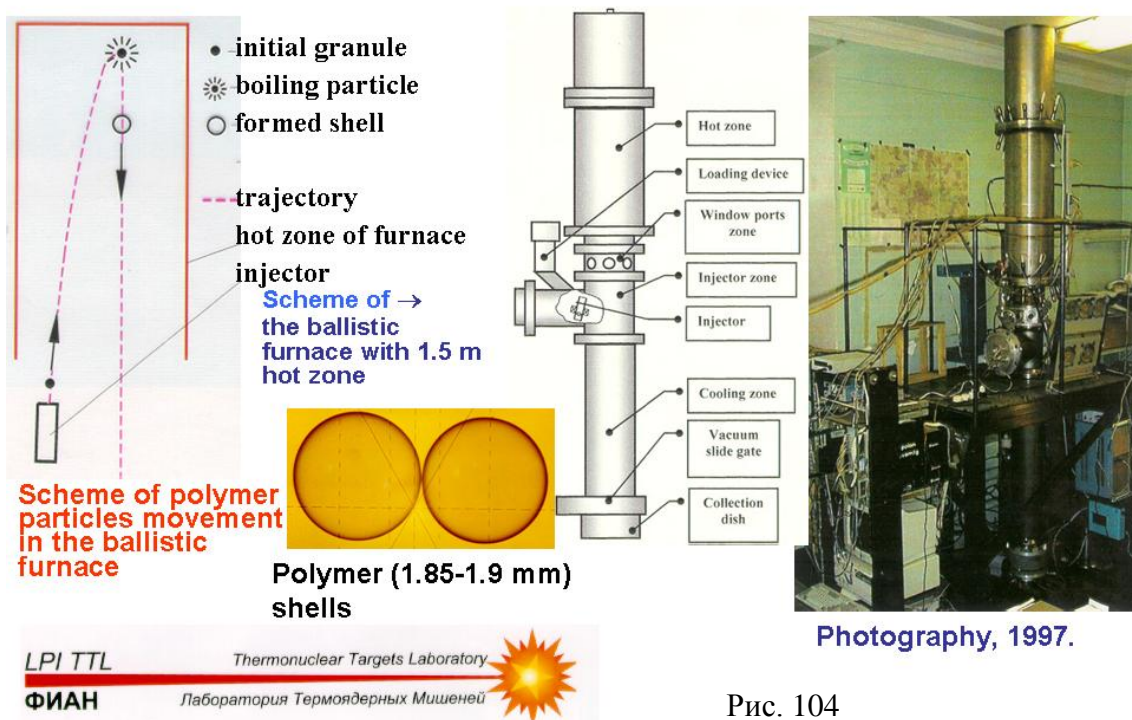


Рис. 104

По возвращении в Москву из США меня ждало письмо из Китая с предложением посетить Институт Ядерной физики и ядерной химии Академии Инженерной физики (по нашему Минатом) в г. Миньянь (аналог нашего Арзамаса-16) близ центра провинции Сичуань г. Ченду. В поездку в Китай в конце марта 1993 года со мной поехали Валерий Михайлович Дороготовцев и Владимир Семенович Бушуев.

Не буду описывать все приключения, происходившие в Китае, который является совершенно другой цивилизацией (даже я бы сказал другой планетой). Но в производственных делах все было как в США. В конференц-зале дома для высокопоставленных гостей для узкого круга специалистов была устроена небольшая конференция, на которой я сделал несколько обзоров (фактически, я излагал то, что было напечатано в обзорных статьях в Томе трудов ФИАН 1992 года издания), но, конечно, излагал свои новые идеи о конструкциях мишеней. В частности, я рассказал о возможности изготовления прямых-непрямых мишеней, в которых вместо кожуха используется оболочка из малоплотного вещества с высоким атомным номером (об этом в отдельном параграфе данной статьи). Китайцы через несколько лет купили у моих друзей установку для производства наночастиц из металлов для этой работы. В.М. Дороготовцев рассказал о работах по технологии изготовления полимерных и стеклянных оболочек, а В.С. Бушуев об оборудовании по заполнению стеклянных оболочек дейтерием до высокого давления, упомянув и тритиевую установку ТУЗ.

На китайских специалистов производило большое впечатление то, что наши технологические работы находятся на уровне работ в США. Я подогревал их интерес тем, что вечером моим изумленным коллегам я долго и громко рассказывал о том, что в



Рис. 105. Наша делегация в Миньяне (Китай). Слева направо: В.С. Бушуев, Ван Гоуян, Ю.А. Меркульев, В.М. Дороготовцев

США многие работы очень засекречены, и об их значении для оборонной тематики. Только дома я объяснил моим коллегам, что в каждой комнате стояла подслушивающая аппаратура, и что эти лекции я читал для китайских спецслужб (за что и был обласкан их вниманием). Нашим переводчиком выступал руководитель Управления внешних сношений Китайской академии инженерной физики Wan Gou Jan (Ван Гоуян см. рис. 105).

Проф. Ван через 5 лет, после выхода с руководящей должности на пенсию, был направлен в Москву представителем своей Академии в нашей стране. Поэтому мы 2-3 раза в год встречались, еще чаще говорили по телефону, когда приезжали высокопоставленные делегации для заключения контрактов. Он приводил высокие делегации в ФИАН, но, к сожалению, задача поставки научного оборудования из ФИАН в Китай у нашей дирекции особого интереса не вызывала.

Интересной особенностью построения научных коллективов в Китае был возрастной состав. Группа специалистов старшего поколения от 50-55 лет и до 65 лет, хорошо знавших русский язык и группа молодых ученых с блестящим образованием и хорошим знанием английского языка в возрасте до 30 лет. Провал в возрастном промежутке объяснялся Культурной революцией в Китае, во время которой специалистов с высшим образованием не выпускалось.

Китайские товарищи объяснили нам, что они готовят контракт с ФИАН на сумму в 250 тысяч долларов, подбирая список, заказываемого оборудования под эту сумму. Интересной особенностью взаимодействия было то, что даже солидные государственные институты не имели права напрямую покупать оборудование и технологию, а все закупки осуществлялись через внешнеторговые фирмы. С торговцами, которые со специалистами приехали в Москву в ФИАН, мы намучились, т.к. им, как всем торговцам, важна была личная выгода. Второй особенностью было то, что уже подписанный контракт должен был утверждаться вышестоящими партийными органами, а на это уходило от 1.5 до 2 лет.

Полтора года до начала первого китайского контракта лаборатории мишенной удалось продержаться, не рассыпавшись, только за счет контракта из США. Первый год этого контракта шел с большим трудом, но к его концу из бизнеса в ФИАН вернулся Андрей Иванович Никитенко. Я передал ему ведение работ по баллистической печи и уже был уверен, что контракт ФИАН выполнит. В группу, выполнявшую контракт, входили кроме Андрея, В.М. Дороготовцев с А.А. Акунцом, С.М. Толоконников и В.С. Бушуев. Но последний из-за постоянного невыполнения договоренных с ним работ был от работ по контракту отстранен.

В работах по первому китайскому контракту почти половина ложилась на В.С. Бушуева. Я как руководитель работ намучился с Владимиром Семеновичем. Он мог создавать уникальное оборудование, но не приготовить к сдаче простых приборов. Бесконечно отвлекаясь на свои домашние поделки, он не успевал выполнить контрактные обязательства в срок. Мне с большим трудом удавалось продлить



Рис. 106. О.Ф. Галкин



Рис. 107. печь падения для изготовления стеклянных оболочек диаметром до 1.2 мм



Рис. 108. А.А. Акунец на печи падения «Полимер-700»

контракт. На нашу беду руководство России нам устроило дефолт, и нам пришлось доделывать работы по контракту без денег. Наши деньги в банках «Российский стандарт» и «Промстройбанк» пропали. Правительство не хотело обижать банкиров, и страдали работающие люди и пенсионеры, у которых отняли «похоронные» сбережения. Мы все таки выполнили контракт. Участвовали в монтаже и успешном запуске оборудования в течение 3 месяцев в Китае В.М. Дороготовцев, А.А. Акунец, В.С. Бушуев и Олег Федорович Галкин (см. рис. 106), с которым мы работали в группе А.В. Антонова с 1968 года.

В Китай по двум контрактам было поставлено 8 технологических установок. Из них за 4 установки отвечал В.М. Дороготовцев: высокотемпературная вакуумная печь падения для изготовления стеклянных оболочек – мишеней (см. рис 107) со специальной установкой для изготовления калиброванных исходных частиц из растворов щелочных силикатов, печь падения для изготовления полистирольных оболочек – мишеней с диаметром до 1.2 мм (см. рис. 108) и установка для изготовления исходных полистирольных гранул для вспенивания.

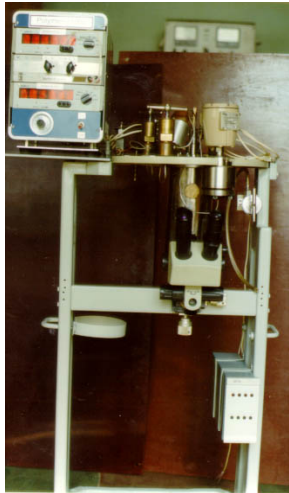


Рис. 109. Установка для заполнения оболочек из полистирола до 1000 атм.

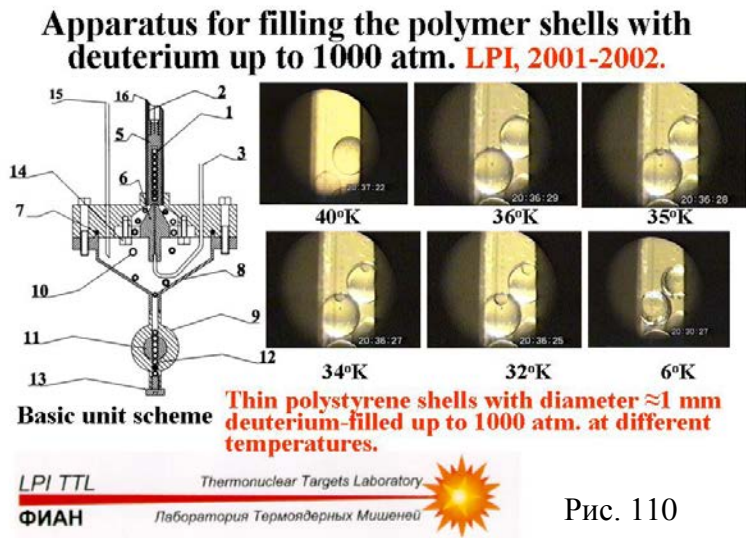


Рис. 110

А за 4 установки для заполнения мишеней термоядерным горючим (см. рис. 109), проходившие у нас под названием лабораторные миниатюрные «компрессоры» отвечал В.С. Бушуев. Фотография оболочек, заполненных дейтерием после охлаждения жидким гелием показана на рис. 110. Это еще не было оборудование для изготовления термоядерных мишеней для микровзрыва, но уже находилось в двух шагах от него.

Хочется проиллюстрировать околонуучную жизнь наших сотрудников в Китае фотографиями, дающими представление о другой цивилизации (см. рис. 111 и 112).



Рис. 111. В.М. Дороготовцев и А.А. Акунец на озере в Китае

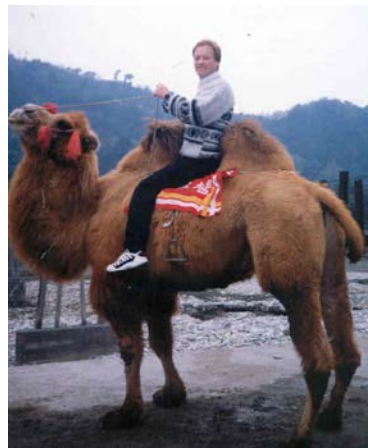


Рис. 112. А.А. Акунец



Рис. 113. Ван Зи Ксю

Почти ежегодно к нам приезжали китайские делегации с нашими заказчиками, которые сопровождал проф. Ван Зи Ксю (Wan Zi Qsu, см. рис.113), заместитель руководителя Управления внешних сношений Китайской академии инженерной физики. Мы подружись с этим веселым и хорошо образованным человеком. Он кончал ВУЗ в Харькове и знал русский и английский в совершенстве. В 1997 году он привез на нашу конференцию по мишеням, которую мы проводили в Москве, большую Китайскую делегацию. На нашу конференцию приехали коллеги из 9 стран, чему китайцы были удивлены. Их до сих пор не пускают на регулярные конференции по мишеням в США.

Подойдя ко мне, Ван шепнул, что приехали заказчики с четвертью миллиона долларов в кармане. В перечне оборудования 1993 года большая печь паления для изготовления стеклянных оболочек была записана со стоимостью 125 тысяч долларов. Но я сказал китайским товарищам, обращая внимание на большое количество зарубежных друзей, что наша стоимость выросла в 2 раза. На что они согласились. Было большой удачей то, что контракт, который мы подписали после окончания конференции, китайские партийные органы выделили валюту только после дефолта в нашей стране и наш аванс не погиб в глубоких карманах сотрудников банка «Российский кредит». Эту технологическую установку собрали и запустили в 2000 году в Китае В.М. Дороготовцев и А.А. Акунец. При разработке и изготовлении этой печи была привлечена частная фирма, которая состояла из бывших сотрудников ВНИИЭТО.

Работы в период с 1994 года по 2006 год для лаборатории мишеней были очень продуктивными. Передавая наш опыт и оборудование нашим заказчикам в научные центры нашей страны и за рубеж, мы успевали придумывать для себя новые конструкции мишеней и развивать новые методы работы с новыми веществами. В дополнение к китайским контрактам мы выполнили небольшие контракты на поставку мишеней и микросфер во Францию и США (фирме General Atomics), печи падения для центра САТ в г. Индоре Индии, а также начали поставки оборудования по двум большим проектам с российскими центрами (НИИЭФА им. Ефремова в Питере и ВНИИЭФ в г. Саров). Продолжение работ в нашей стране останавливалось не по нашей вине, а из-за вмешательства правительственных чиновников. А то бы и сейчас А.И. Никитенко руководил работами по постройке «фабрики мишеней» для ВНИИЭФ.



Рис. 114. R. Khardeker



Рис. 115. Н.Г. Борисенко и А.И. Громов в Индии



Рис. 116. На фоне установки в САТ слева направо: Рашми, А.А. Акунец, Н.Г. Борисенко, Бхавалкар, О.Н. Крохин, И. Завистовская, Р. Кхадекр,



Рис. 117. С.О. Бородин

тяжелых металлов.

Отдельно расскажу о почти 15-летнем содружестве нашей лаборатории с лабораторией Равиндра Кхадекра (Ravindra Khadekar, см. рис. 114) из Центра Передовых технологий (Centre of Advanced Technology, CAT) в городе Индоре (Indore) в Индии. В отличие от нас лаборатория Р. Кхадекара связана с лазерными экспериментами слабо. Поэтому наша совместная работа шла по линии разработки новых технологий изготовления лазерных мишеней в союзе Н.Г. Борисенко (см. рис. 115) и А.И Громова с индийскими сотрудниками.

Были созданы полистирольные оболочки-мишени с наночастицами меди, разработана технология изготовления малоплотных слоев из графита с наночастицами платины и т.д. Кроме этого, наша лаборатория по контракту с САТ изготовила установку (печь падения, см. рис. 116) для изготовления стеклянных оболочек (ответственный А.А. Акунец). Большое участие в проектировании и изготовлении печи принял Сергей Олегович Бородин (см. рис. 117).

В течение 10 лет действует договор о сотрудничестве нашей лаборатории с коллективом, возглавляемым Лалитой Даришвар (Lalita Dhareshwar, см. рис. 118) из Баба Центра Атомных Исследований (Bhabha Atomic Research Center, BARC) в Бомбее в Индии. За эти годы Н.Г. Борисенко с ассистентами выполнила с группой Щивы Чауразия (S. Chaurasia) на лазере (энергия 15 Дж, длительность 0.5 нс) цикл исследований динамики и переноса энергии в микро структурированной околоскритической плазме, в том числе с наночастицами



Рис. 118. L. Dhareshwar

Постоянный обмен рабочими поездками подружил сотрудников ФИАН и сотрудников двух индийских центров. Часто из Индоре от моих сотрудников приходили электронные письма, что у них сейчас хорошо, на этой неделе похолодало 35°C и легкий ветер. Южная экзотика Индии с обезьянами и слонами, добрый нрав жителей и любовь, разлитая в воздухе, к детям и животным, к птицам и растениям, кажется, преображали сотрудников нашей лаборатории, работавших в Индии. У меня вызывало удивление то, что ранним утром в Дели при температуре $+14^{\circ}\text{C}$ индусы в вязанных и перчатках кутаются в теплые одеяла. А прогулки коллег из Индии по обыкновению легко одетых по заснеженной Москве или Звенигороду закаляли их и вызывали у них уважение к людям, которые зимние (по индийским представлениям) температуры $+15^{\circ}\text{C} \div 17^{\circ}\text{C}$ считают теплыми и комфортными.

В нашей научной работе большое значение имели международные конференции, которые мы проводили раз в 5 лет (1997, 2002, 2007) в Москве под названием «Рабочее совещание» (Workshop). Оказалось, что только у нас можно встретить специалистов по технологии термоядерных мишеней с Запада (от Сан-Франциско до Праги) и Востока (от Осака до Сарова, от Миньяна до Санкт-Петербурга). На конференциях с числом участников около 100 человек было 12-16 иностранцев из 7-9 стран (см. рис. 119). Мы издавали доклады в печати и на своем сайте. Председателем Оргкомитета был О.Н.



Рис. 119. Экскурсия 1997 года в Кремль для иностранных участников конференции. Целая экскурсионная группа музея наши участники!

Крохин, а я заместителем Председателя. Основная нагрузка по организации конференций лежала на Н.Г. Борисенко, которая все эти годы поддерживала дружеские связи и переписку с широким кругом специалистов по мишеням, лидерами групп, ведущих эксперименты с термоядерными мишенями.



Рис. 120. Поздравления Бобу Куку



Рис. 121. 2002 год. Американца окружают 4 китайца (2 из Китая, 2 из РФ)



Рис. 122. Кто приезжает заранее могут успеть на прием у Е.Р. Коршевой

Первая конференция 1997 года проходила под девизом «Технология лазерных мишеней и ее применение в других сферах». Большой неожиданностью для зарубежных коллег было большое количество докладов по третию. В дни проведения конференции Бобу Куку исполнилось 50 лет. На рис. 120 показано чтение поздравления.

Вторая конференция 2002 года проходила в рамках Европейской конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом (European Conference on Laser Interaction with Matter, ECLIM) и шла под девизом «Мишени для лазерных экспериментов» (см. рис. 121).

Третья конференция 2007 года проходила под девизом «Термоядерные мишени на пороге зажигания (микровзрыва)» (см. рис. 122). На конференции проходило обсуждение участия России в большом европейском проекте создания мощного лазера и работ по проблеме термоядерных реакторов.



Рис. 123. М. Дан



Рис. 124. А.М. Сергеев

Проект носит название HiPER (High Power Energy Research). Инициативную группу английских и французских специалистов возглавлял Майкл Дан (Mike Dunne, см. рис. 123). Последний день конференции был посвящен докладам ведущих специалистов различных институтов России с предложениями своих разработок в области лазерной техники и элементов, систем пикосекундных мощных лазеров и конечно лазерных мишеней. Майкл Дан отобрал меньше десятка предложений, из которых при составлении программы осталось предложение по пс-лазеру Института Прикладной Физики РАН из Нижнего Новгорода (А.М. Сергеев, см. рис. 124) и предложение ФИАН по серийному формированию криогенных мишеней и частотной подаче их в фокус лазера в камеру реактора (Е.Р. Корешева).



Рис. 125. Участники нашей конференции 2007 года

11. Многоканальные лазеры и проблема сглаживания интенсивности излучения на поверхности капсулы с DT-смесью. Непрямые мишени.

С самого начала работ по ЛТС было ясно, что степень сжатия плазмы будут снижать гидродинамические неустойчивости. Поэтому теоретики и изготовители мишеней боролись за снижение начальных возмущений симметрии мишени, как источников для развития возмущений. Но причиной появления неоднородностей при

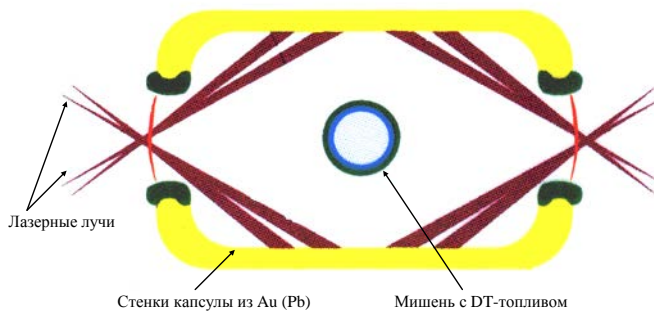


Рис. 126. Непрямая мишень для NIF (США)

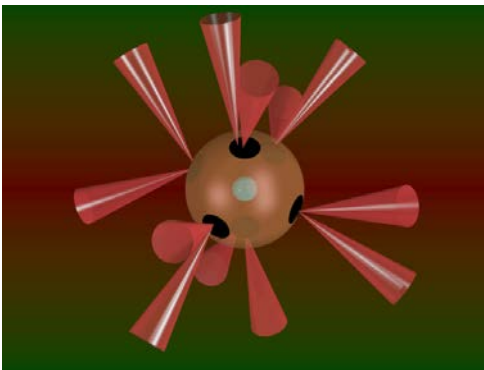


Рис. 127. Непрямая мишень для «Искры-5», ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

движении плазмы к центру были и условия подвода энергии к поверхности сферы. Как говорилось выше, одним из путей повышения симметрии облучения был метод преобразования лазерного излучения в мягкое рентгеновское излучение в замкнутой полости из элемента с высоким-Z (мишень получила название hohl-raum). Это так называемая непрягая мишень (см. рис. 126). Первое, что бросается в глаза, это то, что ради повышения симметрии облучения приходится терять 80-90% лазерной энергии. При более детальном рассмотрении оказывается, что требования к лазеру гораздо более жесткие. Вся энергия лазера должна вкладываться в конвертер (преобразователь лазерного излучения в рентгеновское) за короткий промежуток времени при острой фокусировке на внутреннюю стенку кожуха. В почти замкнутом сосуде – кожухе для ввода лазерных лучей должны быть сделаны отверстия окна, которые уменьшают симметрию облучения (см. рис. 127). При больших энергиях лазера с более длинным лазерным импульсом образующаяся на стенке кожуха плазма, отлетая от стенки, меняет место выделения энергии и, что особенно неприятно, преобразует часть лазерного излучения за счет параметрических нелинейных процессов в рассеянное оптическое излучение, снижая эффективность непрягой мишени.

Неравномерность интенсивности излучения на поверхности прямой мишени вполне естественна, она возникает из-за того, что излучение подводится к мишени от определенного числа окончечных лазерных усилителей. Можно немного расширить фокусное пятно и с потерей энергии сделать облучение более однородным, но добиться полной однородности потока все равно не удастся. Неравномерность облучения просто снижается. Требуются невероятные усилия, чтобы эту неравномерность уменьшить до 3%. Кроме того, внутри одного канала поле лазерного излучения также неравномерно, существует так называемая спекл-структура пучка (существенные мелкомасштабные флуктуации интенсивности).

Во время обсуждения в Троицке проекта строительства нового лазера (назовем проект М.И. Пергамента) теоретики из ВНИИТФ г. Снежинска приводили данные расчетов, которые говорили о том, что в плазменной короне лазерной мишени происходят процессы сглаживания неравномерности освещенности. Для создания первоначальной равномерной короны теоретики предлагали делать специальный в 100 раз менее мощный лазер с равномерным освещением мишени.

Лазерное излучение в плазме эффективно поглощается при электронной плотности плазмы, которая называется критической. Для неодимового лазера с длиной волны 1.054 мкм критическая концентрация составляет 10^{19} электронов в кубическом сантиметре, что соответствует плотности вещества приблизительно 3 мг/см^3 . Напомню, что в веществе твердых мишеней концентрация электронов 10^{23} 1/см^3 . Эффективность передачи энергии тем меньше, чем дальше от поверхности мишени поглощается

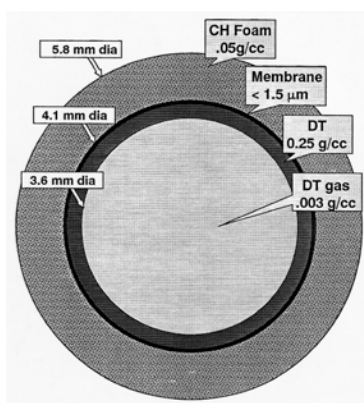


Рис. 128. Мишень для микровзрыва с внешним слоем пены. Проект NRL [92], США

лазерное излучение. Поэтому все вынуждены создавать лазеры, в которых излучение на специальных кристаллах преобразуется во вторую или третью гармонику. Критическая плотность обратно пропорциональна квадрату длины волны. Для третьей гармоники критическая плотность повышается в 9 раз.

Вообще замечено то, что не может сделать драйвер, то должна делать мишень. Теоретики изменяют конструкцию мишени и вводят новые слои или добавки в определенные слои мишени. Возникло и

здесь предложение сделать искусственную корону в виде слоя малоплотного вещества (см. рис. 128) на поверхности рабочей капсулы с DT-смесью (слой пены).

Дополнительным преимуществом искусственной короны мишени стало объемное поглощение лазерного излучения, возникающее из-за флуктуаций плотности (структура) и из-за того, что начальная плотность может быть ниже критической. Объемное поглощение чрезвычайно существенно для уменьшения влияния гидродинамических неустойчивостей.

Предложения теоретиков как всегда не учитывало то, что пены или малоплотные вещества – вещества структурированные (см. рис. 129). Причем в число новых параметров мишени (кроме традиционных – средней плотности и толщины слоя) войдут от 6 до 10 новых параметров. Например, такие параметры вещества как вид

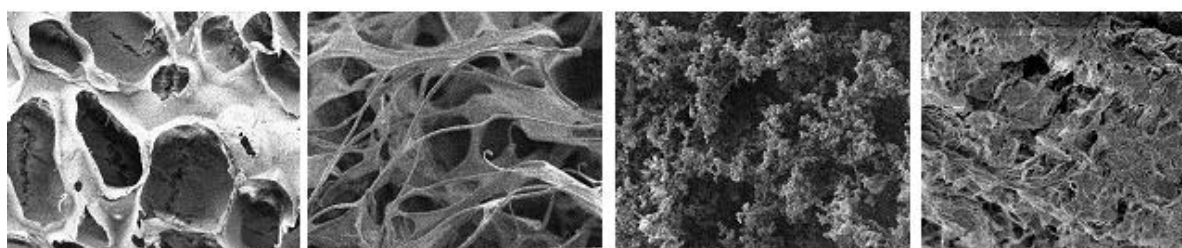


Рис. 129. Различные структуры полимерной пены: слева направо агар, коллаген, поливинилформаль, полиэтилен

ячейки (закрытая, как мыльная пена, частично открытая, полностью открытая или трехмерная сетка), средний размер ячейки, распределение размеров ячеек и наличие крупных пор–пустот, средняя толщина структурных элементов и т.д. Если размеры ячеек больше длины волны лазерного излучения, то возникают проблемы описания поглощения и рассеяния лазерного излучения до и после образования плазмы, нахождения времени выравнивания флуктуаций плотности и пр. Вообще возникает очень важный вопрос: снижая лазерный импринт, не вносим ли мы структурный импринт? Не создаем ли мы структурные возмущения, являющиеся начальной амплитудой развития гидродинамических возмущений? Ясно, что требовались лазерные эксперименты и однородные мелкоячеистые структуры.

Взаимодействие лазерного излучения с «пенами» началось почти на 10 лет раньше, чем возникла необходимость изучения эффекта сглаживания флуктуаций лазерного излучения. Мишени из полимерных пен использовались для экспериментального моделирования взаимодействия лазерного излучения с «протяженной» короной крупных мишеней реакторного масштаба.

В нашей группе мишеней технологией изготовления малоплотных веществ для лазерных экспериментов занималась Наталия Глебовна Борисенко (см. рис. 130). Она нашла себе консультантов и помощников в Институте Элементоорганических



Рис. 130. Н.Г. Борисенко

соединений Академии наук (ИНЭОС АН) в отделе Н.Г. Слонимского, который занимался изучением природных и искусственных гелей (студней). Особенно плодотворно работали с Н.Г. Борисенко Л.З. Роговина и В.Г. Васильев. Наталия Глебовна в ФИАН и в ИНЭОС создала комплекты оборудования для изготовления плоских и сферических малоплотных мишеней из полимерных материалов различной структуры, стремясь получить полимерную мелкоячеистую структуру с минимальной плотностью. Дополнительная задача,

которая стояла перед Н.Г. Борисенко, была разработка методов введения в такие вещества наночастиц тяжелых элементов. Очень полезными оказались работы по получению кремний аэрогелей (мелкоячеистой структуры из SiO_2 с открытыми порами). Вместе с сотрудниками лаборатории металлоорганических соединений Института



Рис. 131. W. Nazarov

прикладной химии в Нижнем Новгороде она разработала способ покрытия тонким слоем вольфрама внутренней структуры кремний аэрогеля.

Участвуя в работе международных конференций, она познакомилась с Вигеном Назаровым (Wigen Nazarov, см. рис. 131) из Шотландии, который разработал способ изготовления полимерной структуры ТМРТА в виде трехмерной полимерной сетки. Он добился получения образцов с плотностью 0.5 мг/см^3 (что в 2 раза меньше плотности воздуха). При этом толщина волокон

была меньше 30 нм, что в 5 тысяч раз тоньше человеческого волоса, а среднее

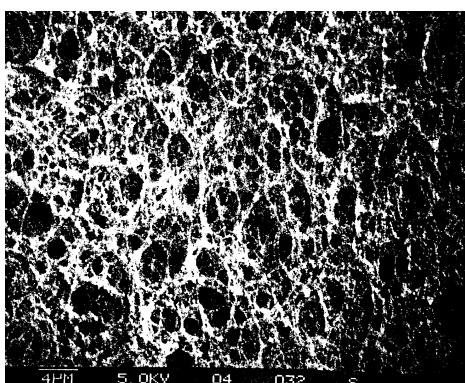


Рис. 132. Полимерная трехмерная сетка В. Назарова. Ширина кадра – 5 мкм

расстояние между волокнами было 0.5 мкм, что соизмеримо с длиной волны лазерного излучения (см. рис. 132). Метод заключается в полимеризации мономера под действием излучения ультрафиолетового лазера с последующей сверхкритической сушкой. Сверхкритическая сушка заключается в замещении растворителя жидким углекислым газом, нагревании выше критической температуры CO_2 , и удалении газа без снижения температуры. Работы выполняются

в специальных автоклавах при давлении до 100 атм. Любой другой способ сушки приводит к разрушению структуры поверхностным натяжением испаряемой жидкости.

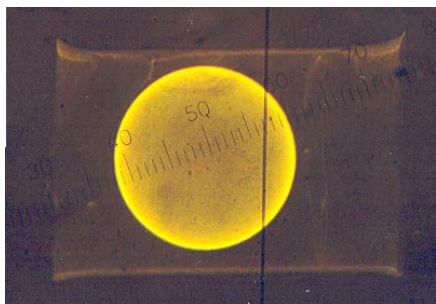


Рис. 133. Стеклоянная оболочка, введенная в полимерную сетку внутри полимерного цилиндра. Снимок в рентгеновских лучах А.И. Громова



Рис. 134. В.Г. Пименов

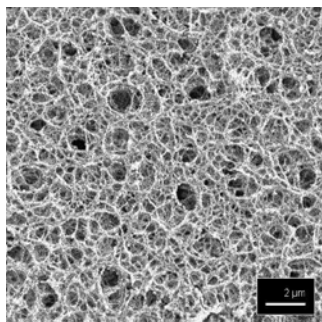


Рис. 135. Трехмерная сетка из ТАЦ. Масштаб – 2 мкм.

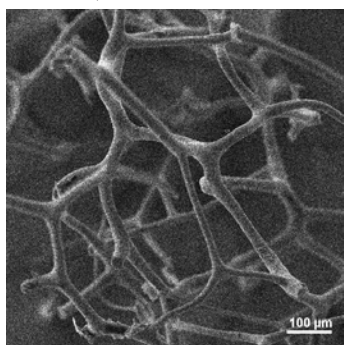


Рис. 136. Морская губка.

Вместе с В. Назаровым Н.Г. Борисенко выполнила работы по получению малоплотных структур, содержащих коллоидное золото. Растворимые соединения золота для нее приготовила Т.Н. Баукова из ИНЭОС. Особенно ценно, что она помогла синтезировать кристаллы водорастворимого золота. Дополнительно В. Назаров и Н.Г. Борисенко выполнили разработку (см. рис. 133) метода размещения стеклянной капсулы (возможно уже заполненной термоядерным топливом) в кожухе непрямои мишени в полимерной сетке с плотностью в 5 раз меньшей критической для третьей гармоники неодимового лазера.

Начиная с 2003 года, вместе с Н.Г. Борисенко работает Владимир Григорьевич Пименов (см. рис. 134) из Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, который разработал получение аналогичной структуры – трехмерных сеток - из триацетата целлюлозы (ТАЦ) через формирование геля и,

применяя сверхкритическую сушку, достиг плотности 0.5 мг/см^3 (см. рис. 135). Удалось сделать мелкоячеистые малоплотные полимерные структуры с наночастицами меди с концентрацией до 30% вес. В ФИАН разработаны методы аттестации мишеней со слоями ТАЦ (измерения среднего расстояния между волокнами, диаметра волокон, доли

наночастиц, которые слиплись в виде гроздей и п.п.).

Для измерения температуры плазмы в веществе мишени должно быть 10-15% хлора. В.Г. Пименов разработал метод введения хлора в структуру полимера, находящегося в виде трехмерной сетки.

Хочется сравнить эти достижения с тем, что есть в природе. На рисунке 136 показано строение морской губки.

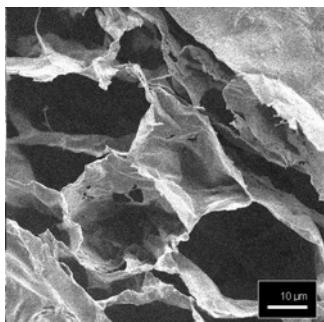


Рис. 137. Агар, 5 мг/см³.
Масштаб 10 мкм

Это трехмерная сетка с волокнами диаметром около 20 мкм и со средним расстоянием между волокнами около 150 мкм. Тонкие нити пауков и шелкопрядов имеют почти такой же диаметр. Кончик жала осы составляет 5-7 мкм. Таким образом, при сравнении с природой становится ясным, что экспериментаторы добились структурных элементов в сотни раз меньше, чем природа. Здесь уместно вернуться к сравнению с другими искусственными материалами. В



Рис. 138. С.Ю. Гуськов

промышленности применяются вспененные полимерные материалы с плотностью, достигнутой В. Назаровым и В.Г. Пименовым, но они имеют поры и пленки ячеек в тысячи раз более крупные. Из природного полимера агар-агара многие химики могут получить образцы с плотностью 0.5 мг/см³, но структурные элементы пленки и волокна и расстояния между ними будут составлять 0.5-1.0 мкм и десятки микрон, соответственно (см. рис. 137).



Рис. 139. Н.Н. Демченко

Теорию сглаживания лазерных потоков в ФИАН развивает коллектив под руководством В.Б. Розанова. Сергей Юрьевич Гуськов (см. рис. 138) разработал модели гомогенизации плазмы из структурированных веществ. Николай Николаевич Демченко (см. рис. 139) ведет расчеты переноса тепла и гидродинамики в плазме из пены по модели последовательности тонких пленок, промежутков между которыми заполнен разреженным газом.



Рис. 140. Н.Г. Ковальский

Теоретические результаты сравнивались с экспериментальными результатами, полученными на лазерной установке «Мишень» (100 Дж, 2.5 нс, $\lambda=1.053$ мкм Nd) в ТРИНИТИ г. Троицка. Опытами на лазере руководил Николай Григорьевич Ковальский (см. рис. 140), а с 2006 года Александр Юрьевич Гольцов. Несколько экспериментов на лазере АВС ядерного центра в г. Фраскати Италии также сравнивались с расчетами наших теоретиков в совместных

публикациях. Работы в Италии выполнялись под руководством А. Caruso, а с 2006 года С. Strangio.

Экспериментальные исследования процессов формирования плазмы из малоплотных веществ и перенос энергии в такой плазме начали вести в 1993 году специалисты из Англии на лазере «Вулкан» и вели разнообразные опыты в течение 5 лет. Интересную работу выполнили в США на установке Nova в Ливерморе.



Рис. 141. Д. Батани

Результаты сравнивали со строгими расчетами по программе ЛАКСНЕС. Опытные и расчетные данные различались, по-видимому, из-за допущения, что вещество мгновенно превращается в газ. Не был учтен процесс гомогенизации плазмы. В качестве мишеней использовался кремний аэрогель с плотностью 8 мг/см^3 и агар с плотностями 4 мг/см^3 и 9 мг/см^3 . Последние 12 лет разнообразные эксперименты на разных европейских лазерах ведут коллективы под руководством Батани (D. Batani из университета Милана Италии, см. рис. 141) и М. Кенига (М. Кеуншг из Политехнической школы во Франции, см. рис. 142) на мишенях, изготовленных В. Назаровым.



Рис. 142. М Кениг

В некоторых экспериментах «пены» из России и из Шотландии применялись одновременно, разница в их строении почти не



Рис. 143. В Праге перед камерой взаимодействия PALS

влияла на результаты экспериментов с плазмой. Так в экспериментах на лазерной установке PALS в Праге в Чехии в 2005 году Н.Г. Борисенко с аспирантом А.М. Халенковым и чешскими коллегами (см. рис. 143) при изучении энергопереноса в плазме из ТАЦ аэрогеля обнаружили существенное

прохождение энергии лазерного излучения (ЛИ) сквозь плазму даже при плотности близкой к критической. В 2006 году этот эффект ими был детально исследован. В 2007 году в экспериментах на лазерных установках LULI-2000 в Париже (см. рис. 144) и LIL в Бордо во Франции эффект пропускания ЛИ сквозь плазму был зарегистрирован и обнаружено существенное изменение скорости движения волны образования плазмы через время 1.2 нс. Это Наталья Глебовна объяснила встречей со слабой плазменной волной от нагрева тыльного металлического слоя пропущенным лазерным излучением. Среди коллег во

Франции особенно выделю Кристин Лабон (Christine Laboane), Сильвию Детьеро (Sylvia Depieraux) из Политехнической школы (Ecole Polytechnic) в Париже и В.Н. Тихончука из университета в Бордо.



Рис. 144. 2011 год. На фоне камеры взаимодействия LULI-2000 участники опытов



Рис. 145. в Германии в GSI



Рис. 146. С.Г. Гаранин

В серии экспериментов в 2002-2010 годов на ускорителе и лазере в GSI в Дармштадте в Германии (см. рис. 149) малоплотные вещества создавали протяженную плазму для последующего изучения торможения в ней ускоренных до высокой энергии сверх тяжелых ионов по программе инерциального тяжелоионного термоядерного синтеза (Inertial Heavy Ions Fusion, IHIF), демонстрировали не прямой нагрев в золотом hohl-raum.

Коллектив специалистов во главе с Натальей Глебовной Борисенко в течение последних 7 лет проводит эксперименты с мишенями из ТАЦ на 4 лазерах в России и на 6 лазерах в 5 странах (Чехии, Франции, Германии, Индии и Японии). В некоторых исследованиях применяются мишени из ТАЦ с добавками наночастиц меди или хлора.

Перечислять всех коллег и друзей Н.Г. Борисенко в разных странах я не буду. В большинстве исследований изучался «тепловой» метод сглаживания флуктуаций освещенности мишени.

Я выделю лишь оригинальный «оптический» метод сглаживания, получивший название динамической плазменной фазовой пластины (dynamic plasma phase plate), который предложен Сергеем Григорьевичем Гараниным (см. рис. 146) и разрабатывается в настоящее время группой Владимира Николаевича



Рис. 147. В.Н. Деркач



Рис. 148. Ю.Е. Маркушкин

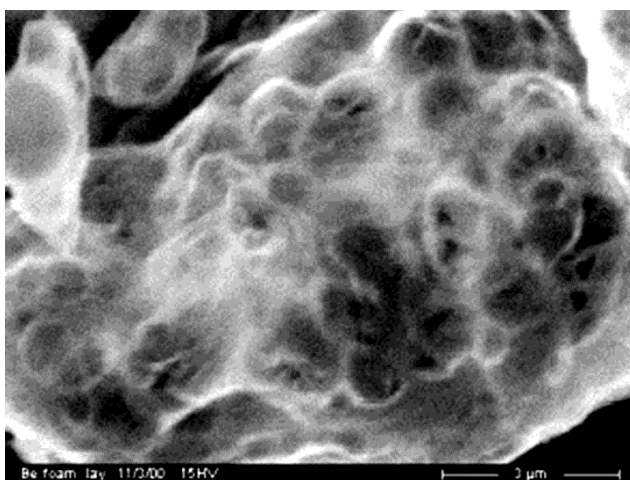


Рис. 149. Пенобериллий, ширина снимка около 4 мкм. Видно, что у пузыря из бериллия стенка тоньше 0.2 мкм. Значит кристаллиты меньше 50 нм.

Бериллий обычно имеет крупные (10-15 мкм) кристаллиты, что исключает возможность изготовления мелкоячеистой структуры. Но Ю.Е. Меркушкин по особой технологии производит бериллий с кристаллитами, имеющими наноразмер 20-50 нм.

Деркача (см. рис. 147). Суть метода заключается в том, что основной поток лазерного излучения пропускается сквозь полимерную сетку, отстоящую на некотором расстоянии от основной мишени. Возникает турбулентный слой плазмы, пропускающий 80-90% лазерного излучения, которое рассеивает излучение на небольшие углы. Причем эти углы и место рассеяния меняются в течение лазерного импульса. Тем самым сглаживается распределение интенсивности лазерного излучения по поверхности мишени в пространстве **и времени**.

Теоретикам легко рисовать слои в мишени для микровзрыва, но как изготовителям мишеней выполнить поставленные задачи? Слой «пены» на поверхности криогенной мишени резко увеличивает время замораживания ДТ-слоя из-за плохой теплопроводности малоплотных структур. Резко повысить теплопередачу

можно лишь сделав «пену» из металла, но условия формирования высокого реактивного давления на поверхности рабочей капсулы требуют применения лишь легких элементов. Из технологически приемлемых металлов есть только бериллий. «Пену» из бериллия никто в мире не делает за исключением коллектива, возглавляемого Юрием Евгеньевичем Маркушкиным (см. рис. 148) из ВНИИНМ им. А.А. Бочвара.

Мы с радостью проводили структурный микроанализ пенобериллия из ВНИИНМ (см. рис. 149) потому, что эти разработки оправдывали идею сглаживания неоднородности лазерного излучения «пенной» на криогенной мишени.

Еще одна разновидность лазерных экспериментов, которые востребовали слои толщиной в 50-100 мкм из мелкоячеистых малоплотных веществ, это опыты по изучению уравнения состояния веществ (УРС) при сверхвысоких давлениях (до 100 Мбар). При движении плоской ударной волны, создаваемой в веществе излучением мощного лазера, через структуру слоев (ступеньки) с постепенно увеличивающейся



Рис. 150. Образец растущего геля перед детектором томографа



Рис. 151. Два образца геля SiO_2 после выдержки 10 часов.

плотностью происходит существенное (почти на порядок) увеличение давления. Таким образом не увеличивая интенсивность лазерного излучения (не надстраивая лазер) а только изменяя конструкцию мишени можно выйти на высокий уровень давлений, экспериментально еще слабо изученный.

Экзотическое предложение создать слои, имеющие плавно увеличивающуюся плотность (градиент плотности) было реализовано в ФИАН, в группе Н.Г. Борисенко. На опыте это было реализовано на примере роста геля двуокиси кремния от границы раствора с катализатором гелеобразования. (см. рис. 150 и 151) с измерением плотности на компьютерном рентгеновском микротомографе.

Совместные технологические разработки были выполнены Н.Г. Борисенко с коллегами и Равиндра Кхадекар (Ravindra Khadekar) со своими подчиненными в лаборатории мишеней в Центре передовых технологий (Center of Advanced Technology, Indore) в Индии.

Работы ведутся без финансирования, на голом энтузиазме, ведь эти работы с наноструктурами, создающими микротурбулентную плазму, нужны для получения новых знаний о плазме и не сулят

немедленного финансового успеха. **Не для Чубайса это дело!**

12. Прямые – не прямые термоядерные мишени. Мишени для тяжело-ионного синтеза.

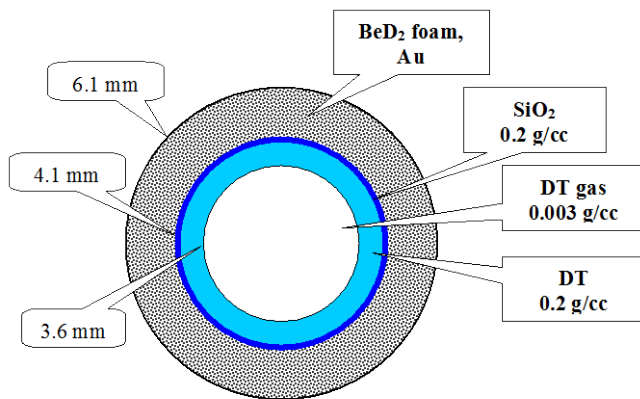


Рис. 152. Прямая не прямая-мишень [18]

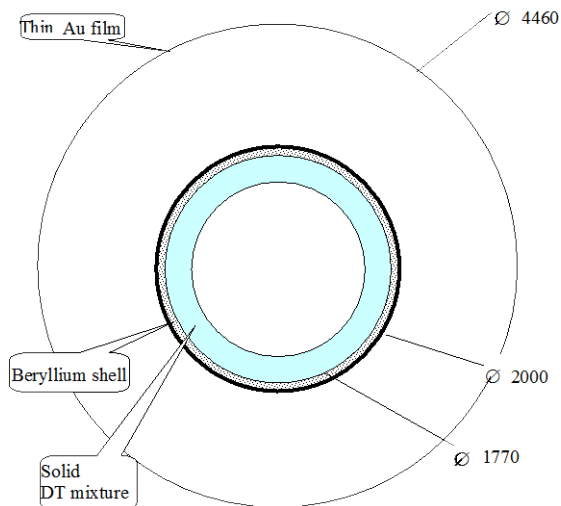


Рис. 153. Прямая-не прямая мишень [19]

Об идее новой конструкции – прямой-непрямой мишени, высказанной в 1993 году во время совещания в Китае, было кратко сказано выше. Ниже попробуем изложить эту идею подробнее с анализом достоинств и недостатков.

На рисунке 152 показана схема такой мишени по совместной статье с Сергеем Юрьевичем Гусковым в

журнале «Квантовая электроника» [18].

Тот же текст был опубликован в виде препринта ФИАН за два года до выхода журнальной публикации. При

подготовке к печати препринта мы

обнаружили статью Веларде с коллегами [19] с конструкцией прямой-непрямой

мишени, но с применением конвертера лазерного излучения в рентгеновское

излучение в виде сверхтонкой пленки

золота (см. рис. 153). В отличии от

типичной не прямой мишени, в которой конвертер заполняет всю полость кожуха

рентгеновским излучением, в конструкции прямой-непрямой мишени с тонкой пленкой

Au рентгеновское излучение большей частью теряется, распространяясь внутрь и

наружу от золотой оболочки. Вторым существенным недостатком мишени с тонким

слоем золота является то, что слой золота быстро разлетается, превратившись в

подкритическую плазму, которая не поглощает лазерное излучение. Преимуществом

нашего варианта конвертера из малоплотного дейтерида бериллия с добавками 50%

золота является долгое время разлета из-за низкой начальной плотности Au и близкое

расположение слоя к рабочей капсуле с DT-смесью, что резко увеличивает телесный

угол для полезного облучения. Ю.Е. Маркушкин с коллегами выполнил даже более

сложную задачу, разработав метод изготовления дейтерида бериллия с градиентом концентрации меди (см. рис. 154)



Рис. 154. Распределение меди по толщине слоя BeD₂. Полная толщина около 9 мкм. В максимуме 12% вес.



Рис. 155. А.И. Громов с установкой

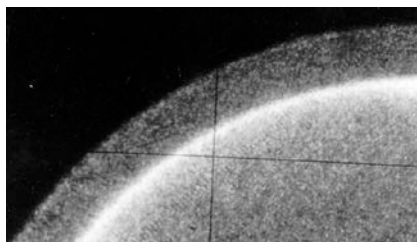


Рис. 156. Стеклянная оболочка со слоем меди с плотностью 30 мг/см³

Другими словами предложен новый «рентгеновский» метод сглаживания неоднородности лазерного облучения термоядерных мишеней. Обидно, то, что первая проверка такого метода сглаживания могла состояться в 1988 году, когда у нас уже заработала тритиевая

установка и Александр Иванович Громов научился покрывать стеклянные оболочки слоем малоплотной меди (из наночастиц) с плотностью 30-50 мг/см³ (см. рис. 155 и 156). Но, к сожалению, перестал стрелять «Дельфин».

В 2003 году вышла статья японских авторов во главе с С. Накаи (S. Nakai, см. рис. 157), в которой дан перечень разнообразных конструкций мишеней. Мишень обсуждаемой конструкции названа непрямо-прямой мишенью.

Параллельно с идеями ЛТС велись работы по тяжело-ионному инерциальному синтезу, которыми в нашей стране руководил Борис Юрьевич Шарков (см. рис. 158) из Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Драйвером в этом случае является ускоритель сгустков тяжелых ионов до высокой энергии (десятки и даже сотни МэВ на нуклон). Конструкция термоядерной мишени в этом случае напоминает непрямою лазерную мишень. Но вместо пустой

полости в такой лазерной мишени (см. рис. 159 [20]) из статьи Марка Табака (Mark



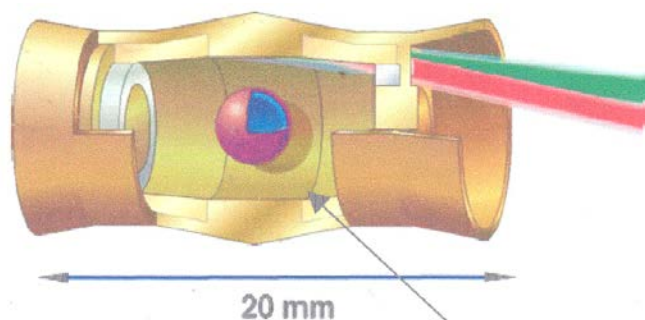
Рис. 157. S. Nagai, 1992

Tabak) теоретика из Ливерморской лаборатории полость заполнена веществом - конвертером, которое энергию тяжелых ионов превращает в энергию мягкого рентгеновского излучения. На роль такого конвертера годится вещество, над созданием которого трудятся Н.Г. Борисенко, А.И. Громов, В.Г. Пименов с ассистентами. Это трехмерная полимерная сетка из триацетата целлюлозы (ТАЦ) с включением наночастиц золота (до 50% вес.) с плотностью от 5 до 200 мг/см³.



Рис. 158. Б.Ю. Шарков

Надо сказать, что малоплотное золото понадобилось и для конвертера в кожухе традиционных непрямых мишеней. Теоретик из Ливерморской лаборатории США Мууди Розен (Moody Rozen) с коллегами сначала в расчете, а затем и в эксперименте показал, что если использовать золото с плотностью в 20 раз меньшей плотности сплошного металла, то температура рентгеновского потока в hohlraum увеличится на 10-15% по сравнению с обычным вариантом, и интенсивность потока увеличится на 5-7%. Это происходит из-за того, что золотая плазма тратит меньше энергии на разлет (на гидродинамику), меньше теряет



малоплотным золотом с плотностью 10 мг/см³

энергию при уменьшении потерь тепла во вне объема, а сэкономленная энергия достается излучению.

Близкие результаты с мишенями из двуокиси олова были получены в Японии (смотри доклад К Нагаи К. Nagai см. рис. 160 на сайте нашей конференции <http://mw2007ta/scheule1/>) в экспериментах по оптимизации

мишеней для лазерной рентгеновской литографии.



Рис. 160. К. Nagai

Александр Иванович Громов развил метод получения наночастиц висмута (порошки золота нам производить дороговато). Были сделаны плоские мишени из малоплотного висмута (100 мг/см^3) и придуман Наталией Глебовной Борисенко с аспирантом Андреем Станиславовичем Ореховым метод измерения плотности порошкового слоя на рентгеновском микротомографе (см. рис. 161). Программу для обработки изображений на томографе написали студенты МГУ Лидия Андреевна Борисенко и Анастасия Маликова. Уже третье поколение



Рис. 161. А.С. Орехов за рентгеновским микротомографом

рода Глеба Владимировича и Лидии Федоровны Склизовых (см. рис. 162) участвует в работах по ЛТС!

Сравнительные лазерные эксперименты с мишенями из малоплотного и сплошного висмута были выполнены Н.Г. Борисенко и А.С. Ореховым с соавторами в отделе Лалиты Даришвар в Центре Атомных Исследований им. Баба (Bhabha Atomic Research Center BARC) в Мумбаи (Бомбее) в Индии. Измерение интенсивности и спектрального распределения рентгеновского излучения плазмы от висмутовых мишеней подтвердили теоретический результат американцев.



Рис. 162. Род Склизовых: слева направо сидят Г.В. Склизов, Л.Ф. Склизова, внуки Глеб Орехов, Лида Борисенко, дочери Н.Г. Борисенко, Т.Г. Орехова, зять Станислав Орехов, стоит внук Андрей Орехов.

Подготовкой лазера и диагностической аппаратуры руководил Шивананд Чауразия (Shivanand Chaurasia). Мишени из пористого углерода с наночастицами

платины делались в группе Равви Кхадекара (Ravindra Khadeker) из RRCAT г. Индора Индии.

13. Оболочки – мишени с дейтерием или DT-смесью в стенке оболочки. Альтернативные топлива.

Рассказывая о технологии изготовления полистирольных оболочек – мишеней с заменой водорода на дейтерий для диагностических целей, мы начали готовиться к изложению цели создания оболочек или капсул с термоядерным горючим для использования этого горючего в микровзрыве крупных мишеней. Диагностическая цель ясна: по изображению сжатой плазмы в заряженных частицах в специальной камере обскура, по числу заряженных частиц от DD или DT-реакций, по энергетическому спектру частиц восстановить состояние плазмы в момент сжатия в горячем состоянии, когда происходят ядерные реакции. В крупных мишенях, в которых DT-смесь зажигается в центре, волна горения (очень высокой температуры) может зажечь термоядерное горючее, входящее в состав вещества оболочки. Такие вещества названы Л. Форманом и Г. Хоффером «альтернативными топливами», которые рассматривали простейшие газы (BH_3 , CH_4 , NH_3) и известные органические вещества.

Эксперименты с повышением выхода нейтронов из мишеней, имеющих структурированный вид – пены из дейтерированного полиэтилена $(\text{CD}_2)_n$ были проведены в лаборатории В.С. Беляева (ЦНИИМАШ, г. Королев) на более высоком уровне с применением лазера «Неодим» (20 Дж, 1.5 пс, $\lambda=1.053$ мкм). Но, к сожалению, повышения нейтронного выхода при уменьшении плотности $(\text{CD}_2)_n$ не было зарегистрировано. В аналогичных экспериментах в Японии был зарегистрирован выход нейтронов, превышающий выход из сплошного полиэтилена в несколько раз.

На нашу конференцию 1997 года представил 2 доклада Юрий Евгеньевич Маркушкин из Всероссийского научно-исследовательского института неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара: первый - о нанобериллии, второй - о пенобериллии. Бериллий с нанокристаллической структурой и пенобериллий производились по оригинальной технологии в отделе, руководимом Ю.Е. Маркушкиным, из дейтерида бериллия (BeD_2).

Американцев заинтересовала возможность приобретения некоторого количества такого бериллия. В те годы в Лос-Аламосе в лаборатории мишеней под руководством Лари Формана мишени – оболочки из бериллия изготавливались на специальных (очень дорогих, ≈ 5 млн. долларов) токарных станках. Из производимого промышленностью бериллия с кристаллитами размером 15 мкм вытачивали две полусферы («папу и маму»), которые затем склеивались. Поскольку скорость звука в

бериллии по разным осям кристалла отличается почти в 10 раз, то такие крупные кристаллиты оказываются затравкой для роста гидродинамических возмущений. Продажа бериллия из ВНИИНМ в США была невозможна, поскольку бериллий находится в списке материалов, запрещенных к экспорту. Если бы эта сделка состоялась, то, возможно, американским лабораториям не пришлось бы разрабатывать технологию изготовления бериллиевых (с нано структурой) оболочек методом напыления на полимерную сферу с удалением газовых продуктов теплового разложения полимера через специально сделанное отверстие.

Пенобериллий заинтересовал нас как материал необходимый для криогенных мишеней - оболочек с внешним малоплотным слоем для сглаживания интенсивности лазерного излучения.

Но больше всего нас заинтересовал дейтерид бериллия, изготавливаемый в коллективе Ю.Е. Маркушкина. BeD_2 – аморфный, прозрачный материал с одним нехорошим свойством: он начинает отдавать дейтерий (разлагаться) при температуре около 100°C . Наша лаборатория совместно с коллегами из Бочваровского института



Рис. 163. С.А. Бельков

выполнила ряд работ, доказавших возможность изготовления оболочек мишеней из BeD_2 [21]. Оказалось, что проницаемость дейтерия в BeD_2 заметно ниже, чем у полистирола и даже кварца. Математическое моделирование зажигания крупных мишеней из BeD_2 по сравнению с мишенями из Be , выполненные для прямых мишеней Н.В. Змитренко с С.Ю. Гуськовым и для не прямых мишеней Сергеем Аркадьевичем Бельковым (см. рис. 163) с коллегами, показало перспективность использования оболочек из BeD_2 .

Коллега из Бочварского института - Владимир Васильевич Горлевский познакомил нас с разработчиками технологии изготовления аминборана (NH_3BH_3), которое является рекордсменом среди твердых веществ по весовому содержанию водорода. Руководитель разработчиков этого вещества - Павел Аркадьевич Стороженко из ГНИИХТЭОС развил эти работы, и был синтезирован содержащий дейтерий аминборан (ND_3BD_3). В.М. Дороготовцев в вакуумной печи падения получил оболочки из аминборана (см. рис. 164).



Рис. 164. Оболочки из NH_3BH_3

Исследования выполненные Ю.Е Маркушкиным с коллегами и независимо американскими учеными доказали, что возможен изотопный обмен дейтерия на тритий в дейтериде бериллия. Коллеги из Бочварского института и ГНИИХТЭОС провели успешный изотопный обмен дейтерия на тритий в аминборане.

Эти работы открыли возможность создания высокоэффективных крупных мишеней с твердой оболочкой, содержащей термоядерное горючее, участвующее в микровзрыве. Еще раз напомним, что такой взрыв является микровзрывом (соответствующим взрыву 50-500 кг химического ВВ) по сравнению со взрывом водородной бомбы. Критическая масса термоядерного горючего в десятки миллиграмм DT, достигается за счет сверхсжатия плазмы.

14. Можно ли турбулентность в плазме заставить выполнять полезную работу? (Идеи создания поверхностного натяжения и вязкости в плазме за счет наночастиц тяжелых металлов).

В начале 80х годов экспериментальные данные из лазерной плазмы свидетельствовали о том, что неравномерность освещения мишени (спекл-структура лазерного пятна) приводит из-за гидродинамических неустойчивостей к существенному снижению объемного сжатия плазмы в центре сферы, да и в короне регистрировались мощные филаменты (плотные плазменные струи, похожие на солнечные протуберанцы). У Наталии Глебовны Борисенко возникла идея разрушить мелкие (микронные) струи плазмы за счет субмикронных вихрей (турбулентности). Для этого в стенке стеклянной мишени нужно было создать наночастицы тяжелого элемента, чтобы вокруг этих тяжелых частиц сформировались плазменные вихри. Идея такая же, как в задаче разрушения кумулятивной струи противотанкового снаряда на одном слое стенки танка, представляющей засыпку из стальных шариков.

Мы познакомили с этой идеей сотрудников, ведущих эксперименты на лазере «Дельфин». Особенно понравилась эта идея Сергею Ивановичу Федотову (см. рис. 79). Мы решили создать технологию изготовления стеклянных оболочек с наночастицами по методу окрашивания стекла коллоидными частицами (красивый красный цвет в стекле за счет наночастиц золота, красивый желтый цвет за счет наночастиц серебра). В СССР за потерю драгметаллов и золота в частности можно было заработать большие неприятности. Химия и технология золота намного сложнее, поэтому мы стали работать с серебром. Добавляя в растворы щелочных силикатов раствор азотнокислого серебра, и дальше высушивая гель и готовя исходные частицы для печи падения, мы в нашей «водородной» печке очень скоро получили нужные нам стеклянные оболочки. Из монографий об окраске стекла мы знали, что, если цвет стекла с Ag яркого желтого цвета, то частицы серебра имеют диаметр 38-45 нм. Если цвет начинает отдавать коричневым, то размер частиц металла больше 50нм, а если просто коричневый, то частицы имеют размер 100-150 нм. Мы выбрали оптимальные режимы изготовления стеклянных оболочек с серебром и получили оболочки чистого желтого цвета. Это означало при содержании серебра 2%, что в объеме стекла 100·100·100 мкм³ содержалось до 15000 частиц, т.е. среднее расстояние между серебряными частицами было около 2.5 мкм. Почти к такой структуре мы стремились. Мы также нашли

технологический режим, при котором получались прозрачные оболочки, т.е. металл находился в виде окисла равномерно распределенного в стекле.

На установке «Дельфин» в течение 2 лет проводились сравнительные эксперименты на сферических оболочках – мишенях прозрачных и желтых. Статистическая обработка результатов (измеряемой величиной было избрано объемное сжатие) показала, что наличие металлических частиц в стекле приводит к улучшению сжатия [17]. Но принято было решение считать, что статистическая точность результата не дает основание утверждать о достоверности данных выводов (о двукратном увеличении объемного сжатия. Статистическая обработка выполнялась независимо Ю.А. Михайловым и Н.Г. Борисенко со мной. Но и то, что внесение возмущений в стенку мишени не ухудшает степень сжатия, является важным научным результатом. Так считал Виктор Павлович Силин, с которым я обсуждал полученные результаты.

Серия аналогичных опытов с нашими мишенями была выполнена на лазерной установке «Вулкан». Измеряемым параметром являлся нейтронный выход от DT-реакции в зависимости от наличия или отсутствия наночастиц серебра. Статистика собиралась в течение полутора лет англичанами и была предоставлена Н.Г. Борисенко руководителем Центра лазерной установки. Обработка выполнялась Н.Г. Борисенко. Результаты, полученные на «Вулкане», полностью подтвердили результаты, полученные на «Дельфине». Нейтронный выход от мишеней с серебряными наночастицами был выше в 2.5 раза, чем от мишеней без наночастиц. Средний нейтронный выход от мишеней с наночастицами был около $3 \cdot 10^9$ нейтронов за выстрел, а без наночастиц чуть больше 10^9 нейтронов за выстрел. Интересен еще один факт. Мы изготовили мишени с кластерами кобальта с диаметром в 20 раз большим, чем у серебра, предупредив английских коллег, что нейтронный выход на них должен быть на несколько порядков ниже. Наши коллеги то ли не верили, то ли забыли про наше предупреждение. Проведя эксперимент на мишенях с большими возмущениями, они писали в электронных письмах, что они не понимают, почему нейтронов практически нет, оболочки то красивые серо-голубые. Оболочки с равномерно распределенным кобальтом имеют яркий синий цвет.

Делая оценки состояния плотной неидеальной плазмы с микровихрями, Наталья Глебовна Борисенко, пользовалась публикациями о генерации сверхсильных магнитных полей в лазерной плазме. Она пришла к выводу, что на поверхности абляции система вихрей может создавать силы похожие на силы поверхностного натяжения в жидкости [22].

«Сумасшедшую» идею создания «резиновой» плазмы, точнее плазмы с повышенной вязкостью, Н.Г. Борисенко пыталась встретить в теоретических описаниях звездной плазмы. Все знают, что в больших гравитационных полях плотная плазма может находиться в состоянии газа, жидкости или твердого тела (кристалла). В некоторых обзорах теоретических работ с описанием плотной относительно холодной плазмы японские ученые доходили до плазмы, обладающей заметной вязкостью, но до резинового или полимерного состояния они не доходили. Введен параметр неидеальности плазмы, который существенен в таких расчетах. Но в популярной статье мне не хочется вдаваться в детали. Здесь надо пояснить, что в плазме в отличие от обычной материи на Земле это состояние не должно быть постоянным. Да и на Земле отдельные части жидкости сотые или тысячные доли наносекунды находятся в кристаллическом состоянии. Если в турбулентном неидеальном состоянии отдельные части плотной плазмы могут находиться в состоянии вязкой плазмы фемтосекунды, то вся плазма в целом будет обладать вязкостью заметно превышающую газовую вязкость, которую мы привыкли плазме приписывать.

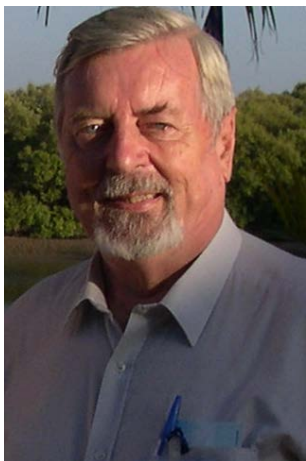


Рис. 165. Н. Нора, 2004 год

Свои расчеты и идеи повышения устойчивости плазмы на стадии абляционного ускорения стенки оболочки при движении к центру Н.Г. Борисенко представила в докладе на международной конференции в 1991 году, заслужив похвалу некоторых зарубежных теоретиков, в том числе Г. Хоры (Н. Нога, см. рис. 167). Экспериментальные данные приходилось добывать по крупицам.

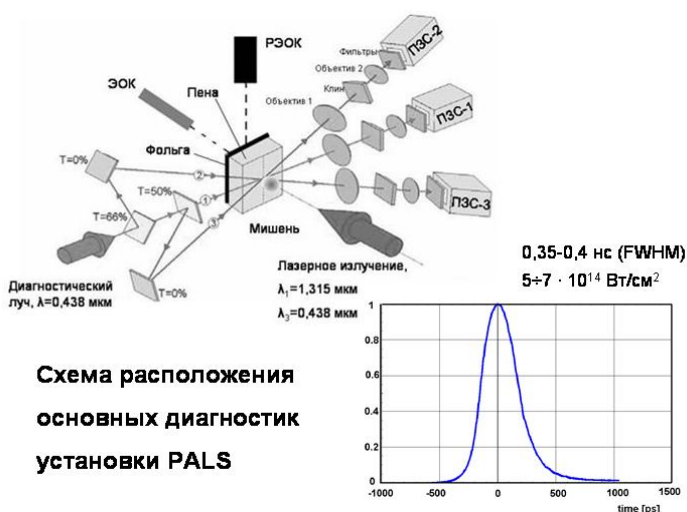
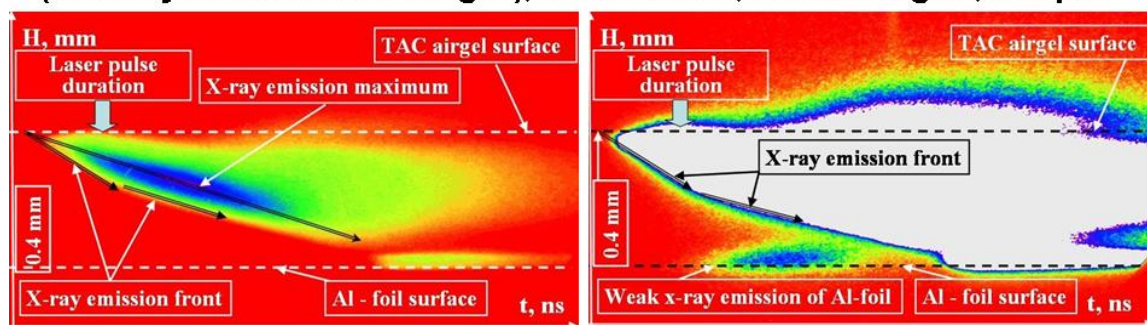


Рис. 166. Схема опытов на установке PALS [23]

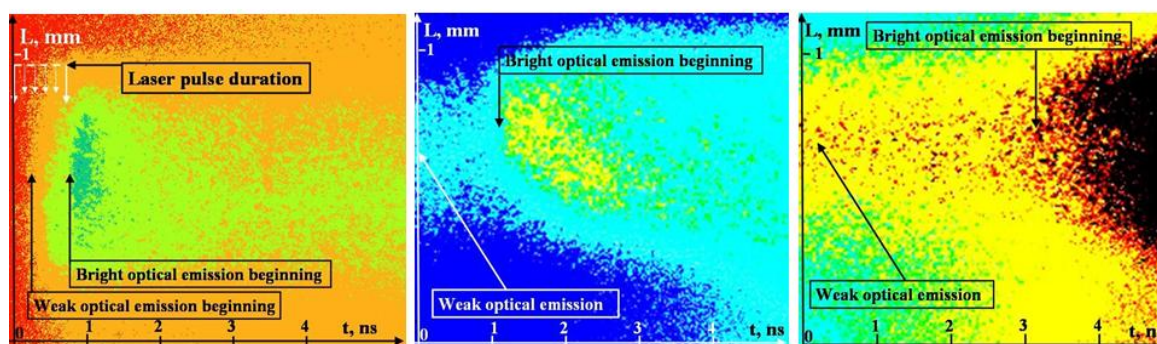
Одним из примеров влияния турбулентности на динамику плазмы может служить сравнение результатов измерения скоростей переноса энергии в плазме из трехмерной полимерной сетки ТАЦ с наночастицами меди и без в опытах на лазерной установке

PALS в Праге (см. схему опытов на рис. 168) [23]. Длительность излучения йодного лазера около 0.35 нс на полувисоте, при длине волны на третьей гармонике 0.438 мкм. В толстых (500 мкм) слоях ТАЦ энергия лазера (около 150 Дж) за время действия лазерного импульса переходит в корону плазмы, которая реактивным давлением ускоряет основную плазму (толщиной около 100 мкм) вперед, создавая тепловую и гидродинамическую волну. Плотность ТАЦ была 9 мг/см³. После окончания действия лазерного импульса волна продолжает распространяться по холодной полимерной сетке, постепенно остывая, пока не дойдет до алюминиевой фольги (см. рис. 169). Плотность малоплотной мишени в обоих случаях одинакова, медь вводится, ее весовая доля полимера удаляется. Время прихода волны на Al-фольгу τ_x и переданная волной фольге энергия измеряется. Оказалось, что время τ_x в плазме с наночастицами меди существенно больше, чем без наночастиц. Переданная же фольге энергия оказалась почти одинаковой.

Presentations of bright and weak signals from X-ray streak-camera (ordinary and intensive images), shot # 28204, TAC 4.5 mg/cc, 400 μ m



Optical streak-camera images for targets with thickness 400 μ m



#28204, 4.5 mg/cc

#28232, 9.1 mg/cc

#28231, TAC&Cu, 9.1 mg/cc

Рис. 167. Время прихода ударной волны к Al-фольге (начало яркого сигнала на двух правых нижних картинках) без Cu 1.5 нс и с частицами Cu 3 нс. Разница 1.5 нс.

Объяснение этому было дано Н.Г. Борисенко следующее. В плазме с наночастицами заметная доля энергии переходит в энергию турбулентного движения, что уменьшает скорость движения волны. Но при ударе о преграду вся энергия (и слаботурбулентной

плазмы, и сильно турбулентной плазмы) достается Al-фольге, что и фиксируют приборы.

За 3 года до смерти Алексей Максимович Фридман опубликовал в УФН обзор, в котором был небольшой фрагмент, где он обсуждал турбулентную вязкость. Он доказал, что в определенных условиях турбулентная вязкость может увеличиваться на 11 порядков, объясняя наблюдаемое в астрономии сравнительно медленное гравитационное перетекание массы некоторых малых звезд в крупные звезды в двойных системах. После одного из последних научных выступлений на Ученом совете ФИАН А.М. Фридмана я подошел к нему с вопросом о возможности повышения турбулентной вязкости в экспериментах с лазерной плазмой. Я человек косноязычный и, возможно, невнятно задал вопрос. Ведь он в пространстве оперировал парсеками и во времени годами и десятилетиями, а я говорил о плотной «холодной» плазме миллиметрового масштаба и временах доли наносекунды. Он ответил, что не понимает как эти процессы можно считать подобными. Мы говорим на языке аналогий, а нужны математические доказательства.

Н.Г. Борисенко бьется над задачей вязкой плазмы почти 30 лет. Но есть и другие примеры длительного поиска объяснений явлений в плазме. Более ста лет человечество пытается понять тайну шаровой молнии, плазменного образования, которое неизвестно как формируется и из чего состоит.

Не знаю как Наталия Глебовна Борисенко, а я не могу выбросить из головы идею с получением вязкой плазмы, которая может существенно помочь получению минимальной критической массы термоядерного топлива. Тем более, что в Европе и нашей стране постоянно ведутся лазерные эксперименты с структурированными мишенями из ТАЦ и ТАЦ с наночастицами меди. Возникают экспериментальные данные о гидродинамике турбулентной плазмы, которые не объясняются традиционной теорией без привлечения представления о вязкости турбулентной плазмы.

15. В ожидании экспериментальной демонстрации взрыва микрокритической массы на мощных лазерах и Z-пинчах. Большая часть рисунков дана по обзорному докладу из США на нашей конференции 2007 года, произнесенного Бобом Куком.

В конце 2009 года в США была запущена крупнейшая лазерная установка в мире

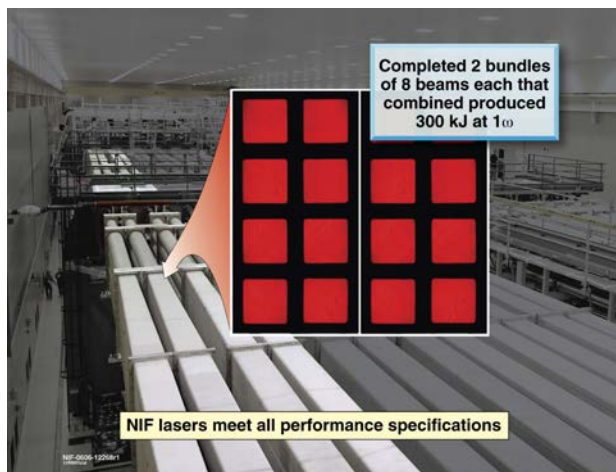


Рис. 168. Кластер из 8 пучков

для исследований по лазерному термоядерному синтезу NIF (National Ignition Facility) Национальная установка для зажигания (подразумевается микрокритической массы DT- смеси). Аналогичную установку LMJ строят во Франции. По проекту лазер, состоящий из 196 каналов усиления, каждый из которых способен выдавать энергию около 10 кДж в течение нескольких наносекунд.

Площадь одного пучка составляет $40 \times 40 \text{ см}^2$. Такие каналы группируются по 8 штук в один кластер (см. рис. 168), а 24 кластера формируют усилительные каскады, в которых лазерное излучение проходит несколько раз через большие плиты из фосфатного стекла, содержащего окислы неодима. Перед вводом излучения от 32 кластеров в камеру взаимодействия излучения с



Рис. 169. Камера установки NIF перед монтажом.

непрямой мишенью лазерный свет преобразуется на специальных огромных кристаллах в третью гармонику (0.353 мкм). Через 32 кристалла преобразователя в третью гармонику, кварцевых объективов, все с диаметром около 2 метров, лазерное излучение приходит в вакуумную камеру, имеющую диаметр 10 метров (см. рис.

169), и попадает внутрь цилиндрического кожуха непряой мишени (см. рис. 170). Лазер расположен в девятиэтажном здании, имеющего площадь двух футбольных полей (имеется ввиду американского футбола, см. рис. 171). И такое же подземное

сооружение наполнено наилучшими электрическими конденсаторами, накапливающими энергию, которая разряжается в больших разрядных лампах, которые облучают Nd-стекло в течение долей миллисекунды. Но все это сооружение предназначено для того, чтобы в кожухе мишени диаметром 9 мм и длиной 12 мм создать золотую плазму, которая облучает интенсивным потоком мягкого рентгеновского излучения 2 мм бериллиевую оболочку с криогенным слоем DT-смеси!



Рис. 170. Мишень NIF

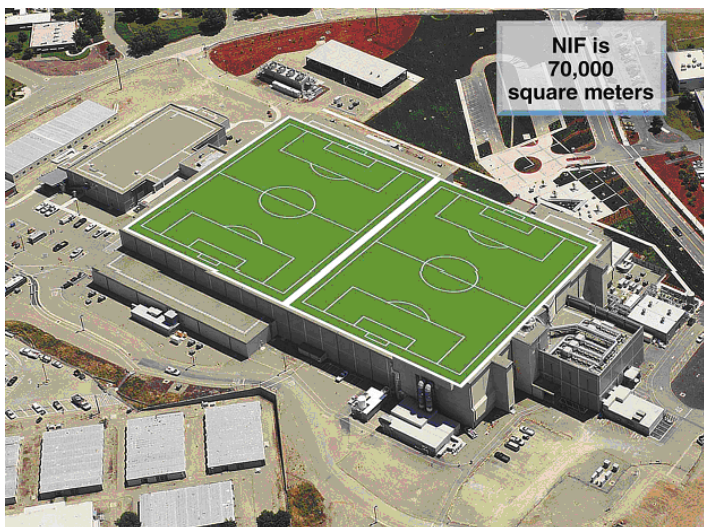


Рис. 171. Лазерная установка NIF площадью в два футбольных поля

По сравнению с лазером – монстром, строительство которого обошлось в 3 миллиарда долларов (стоимость большого автомобильного завода), лазерная мишень кажется недорогой мелкой игрушкой, но она представляет собой сложнейшее сооружение (см. рис. 170), на разработку технологии изготовления которого было затрачено в США в течение 10 лет 0.5

миллиарда долларов! А то, что 2 мм оболочка содержит около 10 мг DT-смеси, говорит лишь о колоссальной концентрации термоядерной энергии в миниатюрной критической массе. При полноценном взрыве такой мишени может выделиться энергия равная взрыву 10-50 кг химического ВВ, поэтому камера взаимодействия имеет диаметр 10

метров (см. рис. 169). Устройство

ввода мишени в камеру установки NIF представляет собой сложнейшее инженерное сооружение с длиной более 10 метров (см. рис. 172). Во Франции строится аналогичный мощный лазер LMJ (Laser Mega Joule), запуск которого планируется через несколько лет. Прототип оборудования для изготовления и доставки в фокус лазера LMG криогенных мишеней показан на рис. 173.

В США недавно вошла в строй огромная установка, называемая **Z- machine** в фирме Сандиа (США), (колоссальный Z-пинч), создающий мощный поток рентгеновского излучения. Труднейшей инженерной задачей является уменьшение

длительности рентгеновского импульса, обострение разряда. В настоящее время характерное время генерации рентгеновского излучения в Z-пинчах составляет 50-70 наносекунд (а нужно в десять раз короче!).

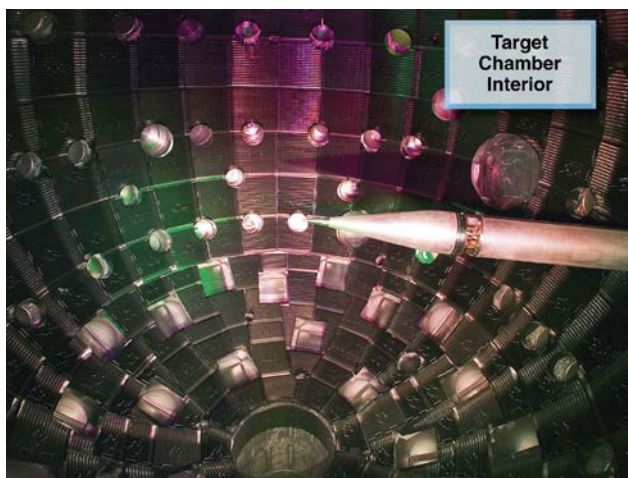


Рис. 172. Ввод криогенной мишени внутри камеры NIF

Первые эксперименты на лазере NIF, проводимые пока на половинной энергетике, показали, что нейтронный выход пока на 2 порядка ниже расчетного и плотность плазмы DT-смеси (степень сжатия термоядерного горючего) в 3-5 раз меньше уровня, необходимого для горения (микровзрыва). Оказалось, что заметная часть лазерного излучения, рассеиваясь на турбулентной золотой плазме, превращается в другое световое излучение (вынужденное рассеяние Мондельштама-Бриллюэна), а не в мягкое

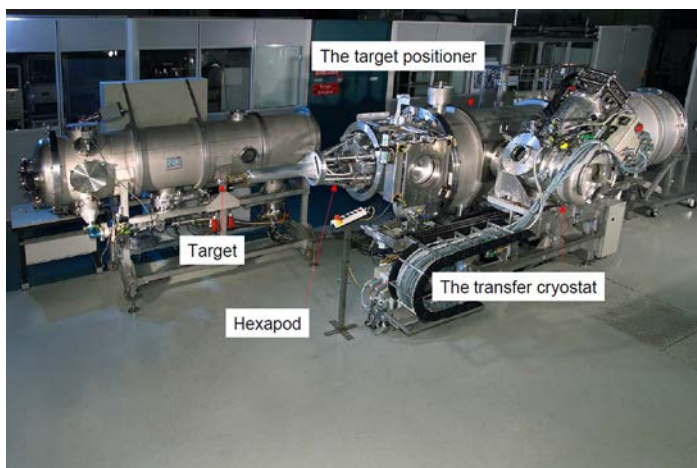


Рис. 173. Оборудование для изготовления и транспортировки криогенных мишеней на LMG

Оправдание движения по этому направлению находится не в научной целесообразности, а прикладном военном применении, в необходимости

Хочу напомнить, что в 1988 году американцы на полигоне Невада произвели ядерный взрыв, целью которого была проверка возможности при рентгеновском облучении достичь сжатия и микровзрыва малого объема DT-смеси – прообраза крупной термоядерной мишени. Судя по газетной публикации (см. Приложение) об испытании, эксперимент прошел успешно.

рентгеновское излучение.

Надо признаться честно, мне не нравится направление работ – лазерные не прямые мишени, т.к. при увеличении энергии лазера усиливаются технические и инженерные проблемы реализации чисто рентгеновского облучения рабочей сферической капсулы с внутренним твердым слоем DT-смеси.

экспериментального моделирования процессов, которое дает возможность уточнять программы расчета срабатывания боевого оружия (атомных бомб). Гораздо интересней концепция достижения зажигания (микровзрыва) при прямом лазерном облучении мишеней. Но из-за гражданской направленности этого направления ЛТС оно не получает должной финансовой поддержки государств.

В качестве яркого примера мужественного отстаивания преимуществ прямого облучения мишеней служат исследования на лазерной установке «Омега» в США, ведущиеся под руководством Роберта Мак-Крори (R. McCrory). Американским коллегам удалось построить 60 канальный лазер с рабочей энергией около 10 кДж (максимальная проектная энергия 30 кДж), создающий почти идеальное поле освещения сферической оболочки – мишени. Флуктуации освещенности не превышают 1.5%. Достигнут высокий нейтронный выход 10^{15} нейтронов за выстрел и высокая плотность сжатой плазмы из DT- смеси (до 150 г/см^3). К сожалению, эксперименты с криогенными мишенями (типа влажная пена – wetted foam) дали нейтронный выход на два порядка ниже оптимального из-за несовершенства мишеней. Я верю в то, что после отработки дополнительных лазерных пикосекундных каналов экспериментаторы на «Омега» получат на криогенных мишенях нейтронный выход на уровне 10^{16} , т.е. продемонстрируют физический breakeven. Термоядерный энергетический выход превзойдет вложенную лазерную энергию.

Недостатком научной области инерциального термоядерного синтеза, как, впрочем, и магнитного, является то, что руководство программ гналось за экспериментальным доказательством возможности применения этих систем для производства электроэнергии. При этом оставались неизученными тонкие детали переноса в плазме тепла и массы, особенности развития гидродинамических неустойчивостей, вопросы генерации и транспортировки мягкого рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения (вакуумного ультрафиолета) и т.п. Бросались или перестраивались лазеры с энергетикой на уровне 10 кДж, которые могли уточнять физические константы переноса в плазме и давать возможность проверять некоторые новые «сумасшедшие» предложения. В ядерной физике так к ускорителям не относились, многие ускорители средней и малой энергии служат по 20-40 лет.

Те, кто играет в карты – преферанс поймут мою аналогию. Ведущие руководители программ хотели выиграть за один заход на «бомбе» в темную, в то время как научная работа больше напоминает попытку выиграть на вистах (постепенно собирая знания).

16. О возможности построения энергетических реакторов, национальные и международные проекты.

Мне, потомственному инженеру, казалось совершенно непонятно, как можно говорить о проектах электростанций с использованием лазера, у которого постоянно чего-то отваливается. То лампа накачки взорвется (хорошо, если одна), то в лазерном стекле появятся пузыри из-за самофокусировки, то конденсатор пробьется и т.д. Я считал это дело абсолютно безнадежным, хотя физика плотной горячей плазмы была интересной. К тому же казалось, что если не сломаюсь, то удастся поработать на интенсивном нейтронном источнике с длительностью вспышки около 0.1 наносекунды. Но постепенно развивалась техника, лазеры стали надежнее. На чешском лазере PALS выстрелы могли происходить по нашим мишеням 3 раза в час с одинаковой энергией в выстреле. Стали производить в промышленных масштабах надежные мощные полупроводниковые лазеры, применяемые для накачки лазерных кристаллов и стеклянных элементов. Оказалось, что уже можно говорить о лазерных установках, способных работать в частотном режиме долго. Конечно, их стоимость выглядит устрашающе, но задача строительства электростанции уже кажется не безнадежной. Такую систему Э. Тейлер сравнил с двигателем внутреннего сгорания. Пока такой двигатель выглядит слишком большим, но не больше токамака ИТЭР.

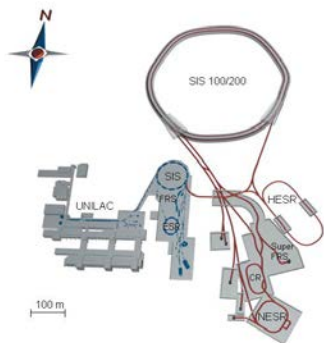
Преимуществом инерциальных схем с точки зрения инженерных систем будущих электростанций является во-первых, то, что камера взаимодействия находится отдельно от драйвера. И в связи с этим тепловая часть инерциального термоядерного реактора (ИТР) может быть более простой, чем токамака, в котором этот ускоритель с криогенной камерой должен находиться внутри МТР теплового агрегата электростанции. К тому же, во-вторых, интенсивность нейтронного потока в blankets ИТР намного выше, чем у МТР (термоядерного реактора с магнитным удержанием), что дает выше КПД.

Остается ответить на вопрос, может ли топливо этих систем – лазерные термоядерные мишени (топливо для микровзрывов) - стоить достаточно дешево при массовом производстве. Ответ для всех очевиден, дешевизна мишеней может быть обеспечена, если не брать нерешенный вопрос с равномерностью криогенного слоя DT-смеси и шероховатости внутренней его поверхности.

Многие национальные и международные проекты программ в области инерциального термоядерного синтеза нацелены на энергетическое применение ИТС.

лазеров, сделав решительные шаги в создании отдельных лазерных усилительных каналов и продемонстрировав технологические возможности производства в своих

FAIR: Facility for Antiproton and Ion Research



Novel beams

Exotic nuclei

Anti protons

Novel beam quality

Beam intensity

beam-Precision

странах крупногабаритных лазерных стекол, кристаллов и оптических систем. В нашей стране разработан масштабный проект пинчевой установки «Байкал», частичным прототипом которой является установка «Ангара-5» (см. рис. 178) в Троицком институте научных исследований и технологических инноваций (ТРИНИТИ) в г. Троицке (из системы Минатома).

Рис. 175. Проект ускорителя тяжелых ионов FAIR

Надо сказать о еще одной разновидности проектов ИТС, к которой я отношусь крайне отрицательно, это проекты так называемых гибридных реакторов (частотных урановых подкритических систем с впрыском нейтронов от частотной лазерной термоядерной установки). В США проект через 15 лет предусматривает перевод установки NIF после модернизации на вторую гармонику и сооружение уранового blankets для отработки частотного режима работы урановой конструкции.

Хотелось сказать о влиянии крупных национальных и международных программ на состояние наукоемкой промышленной продукции. В таких проектах инженерные и технические решения находятся на грани возможного (или даже за гранью возможного). В передовых индустриальных странах развитие в процессе выполнения программ технологии и оборудование почти сразу поступает на рынок и приводит к техническому перевооружению промышленности. Поэтому те огромные деньги, которые вкладывает правительство в приоритетные научные программы, оборачиваются инвестициями в национальную промышленность. Я на одной из международных конференций в США питался за одним столом с владельцем-директором крупной химической фирмы, которая производит сверхвысокопрочные полимерные пленки. Он считал за честь участие в разработке модификации своего полимера, которая снизила бы проницаемость его для изотопов водорода, считая, что после выполнения этой работы, его продукция займет новую нишу на рынке. Национальная экономика становится наукоемкой и конкурентоспособной. Научные работники, занятые 10-15 лет передовыми разработками, переходят работать в

отраслевые НИИ или заводские лаборатории на более высокую зарплату. А на смену им приходят амбициозные выпускники университетов. Происходит общий подъем образовательного уровня работоспособного населения.

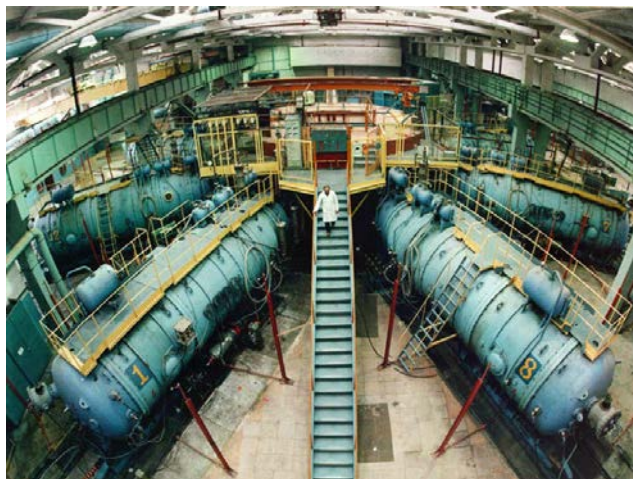


Рис. 178. Установка «Ангара-5» в Троицке

В процессе подготовки новых национальных и международных проектов в их программу вносятся уже использованные в мировой практике технические и технологические решения. Но совершенно не обязательно, что в процессе гонки престижа в спешке не были отвергнуты или не рассматривались оригинальные, порой парадоксальные предложения,

которые при доработке могут дать определенные преимущества новому проекту. При начале создания проекта надо просмотреть все новые предложения и предложения, высказанные давно, но не принятые к реализации.

Приведу аналогию. Нынешняя ситуация напоминает сбор грибов в лесу, когда все грибники идут по одной уже проверенной дорожке. Весь лес обойти, конечно, дольше, но зато результат будет внушительнее.

Рассмотрим очень предварительный пример с серийным производством криогенных мишеней. Существующий в настоящее время на установке NIF способ получения однородного слоя фактически заключается в создании практически монокристаллического слоя с выравниванием его толщины за счет β -layering (см. раздел 7). Но такой способ не применим в реакторных частотных условиях. Вспомним несколько предложений, оставленных без внимания:

1 – Предложение (патент) Чака Хендрикса. Получение полых капель DT-смеси, с последующим их замораживанием при падении в атмосфере холодного гелия, дополненный предложением (патент) намораживания слоя неона или криптона (или криптона, а затем неона) в виде оболочки.

2 – Предложение И.В. Александровой и Е.Р. Коршевой. Изготавливать мишени с критической (с точки зрения тепловых, а не лазерных свойств) плотностью DT-смеси. За миллисекунду до основного лазерного выстрела, слабым лазером создать ударную

волну к центру мишени, которая приведет к формированию жидкого слоя на внутренней поверхности оболочки и газовой полости в центре.

3 – Предложение Чака Хендрикса (есть ли патент неизвестно). Заполнять мишень твердыми шариками DT-смеси микронных размеров от капельницы через трубочку в стенке мишени.

4 – Предложение Ю.А. Меркульева. Заполнять мишень снегом (наночастицами) DT-смеси. Затем слабым лазером организовать ударную (тепловую) волну, которая создаст жидкий слой на внутренней поверхности (за счет втягивания частиц в жидкость силами смачивания) и газовую полость внутри.

Этот перечень может быть продолжен, но мы на этом пример остановим.

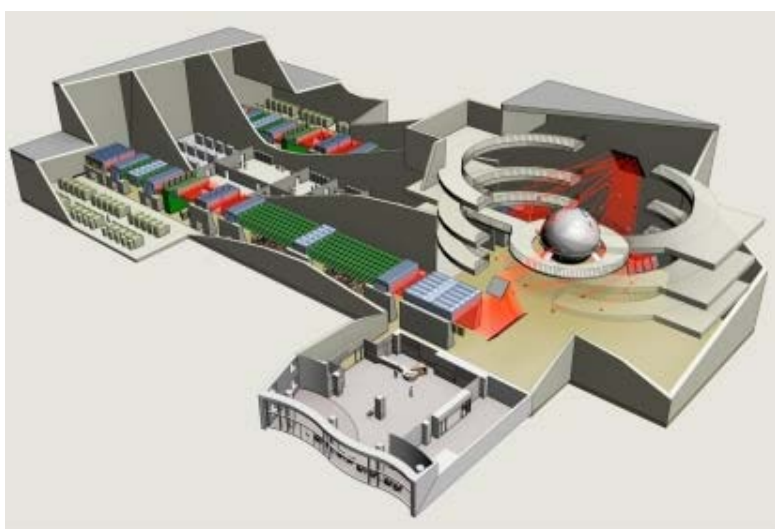


Рис. 179. Проект мощного лазера HiPER

Предложения ФИАН в Европейский проект HiPER (см. рис. 179) кроме метода формирования криогенного слоя в мишени и частотной доставки мишеней в фокус лазера содержали еще предложения по анализу различных вариантов мишеней для прототипа реактора:

1 – Рабочий вариант термоядерной мишени для частотной системы в виде стеклянной оболочки с криогенным слоем. Серийное производство при очевидной дешевизне. Снижение эффективности мишени из-за отказа от полимера со слоями добавок брома, но улучшение условий для формирования криогенного слоя.

2 – Доведение до практического применения метода разравнивания неоднородности лазерного излучения за счет применения малоплотных полимерных веществ с добавками наночастиц металлов со средним Z или высоким Z .

3 – Разработка технологии изготовления оболочек мишеней из твердых веществ, содержащих термоядерное горючее, с целью уменьшения эффекта ослабления нейтронного выхода из-за турбулентного перемешивания на границе стенка оболочки – DT-смесь.

4 – Проверка в лазерных экспериментах (validation experiments) возможности повышения устойчивости движения оболочки (или плоских слоев, моделирующих

фрагмент оболочки) за счет введения в вещество наночастиц металлов со средним или высоким Z .

Напомним, что во всех грандиозных проектах предусматривается формирование и подрыв микрокритических масс термоядерного горючего, а первичное состояние этой взрывчатки представляет собой выполненный с высочайшей точностью шарик – оболочку с диаметром от 2 мм до 5 мм – термоядерную мишень (размером со спичечную головку!).

17. О современном состоянии лабораторий мишеней в разных странах.

С середины 70х годов и начала 80х годов, когда мы ввязались в безнадежное соревнование с богатыми зарубежными лабораториями термоядерных мишеней, прошло больше 25 лет. Ситуация в нашей области существенно изменилась. Основные лидеры – лаборатории США и Японии претерпели значительные перемены. В США с целью выделения ответственного за мишени для установки NIF основное финансирование было сосредоточено в фирме General Atomics в Сан Диего, оставив небольшую часть для прямых мишеней на лазере Omega в Рочестере. Лаборатории мишеней в Ливерморе и Лос-Аламосе фактически сошли на нет, осталось лишь небольшое количество сотрудников. Мишенная часть в Сан Диего расширилась до отдела в 60-70 человек, но все равно с трудом справляется с ответственным заказом из Ливермора, особенно с криогенной частью выполняемых работ. Руководство отдела часто менялось (назначались управленцы – менеджеры), поэтому назвать нынешнего лидера не смогу. Из давно знакомых назову лишь А. Nikroo – отвечающего за изготовление оболочек (заведующего лабораторией по нашему), Е.Р. Marples, в криогенных мишенях, перешедшего из LLNL, J.D. Sater и относительно молодого В.Ј. Kozioziemski, отвечающую за «пены» Диану Шроен (D. Shroen), перешедшую из Shaffer Asc. В Рочестере продолжает активно работать лаборатория мишеней во главе с Дэвидом Хардингом (David Harding).

Даже регулярные международные конференции в США проводятся по очереди только General Atomics и LLE из Рочестерского университета.

Большие усилия предпринимаются во Франции по программе LMJ в области технологии мишеней. Программа одна, но выполняется она в 6 научных центрах в

разных Департаментах Франции. Основные деньги, как и в США тратятся на криогенные мишени, и мне кажется, что оболочки они буду покупать у General Atomics. Япония приостановила активное участие в ЛТС, оставив лишь поддержку и модернизацию лазера Gekko-XII. Поэтому постепенно теряет свои позиции некогда очень активная лаборатория мишеней во главе с Т. Норимацу.

Интенсивно наращивает свои возможности лаборатория мишеней в Центре лазерного синтеза в Миньяне в Китае. Но пока о работах этого коллектива над криогенными мишенями мы не слышали. Субординация там оригинальная, поэтому рассказать о том, кто там начальник я не могу, хотя со многими китайскими коллегами мы испытываем взаимную симпатию.

В AWE (Aldermaston Weapon Establishment) в Великобритании активно строится лаборатория термоядерных мишеней, на протяжении многих лет возглавлявшаяся Б. Льюисом (B. Lewis,), хотя в ней также отсутствует ряд мишенных специальностей.



Рис. 180. Chris Spindloe

Лаборатория мишеней в RRCAT в Индоре в Индии, долгое время руководимая Р. Кхадекар, тоже перекрывает лишь некоторые области общей технологии мишеней.

Отдельно надо сказать о сильной лаборатории лазерных мишеней в Резерфордской лаборатории, руководимой Мартином Толлием (Martin Tolley), с ключевым работником или соруководителем Крисом Спиндлоу (Chris Spindloe, см. рис. 180). Этот коллектив



Рис. 182. В.М. Изгородин

изготавливает уникальные мишени для пикосекундных и фемтосекундных лазеров, но не пытается отнять хлеб у General Atomics в изготовлении оболочек и тем более в области криогенных мишеней. см. рис. 180

В последние 10 лет активно развивается, расширяется и оснащается лаборатория мишеней в Институте

лазерно-физических исследований во РФЯЦ ВНИИЭФ в г. Сарове, руководимая Владимиром Михайловичем Изгородиным (см. рис. 182). До сих пор остается

нерешенным вопросом о собственной тритиевой установке и оснастка работ с криогенными мишенями желает быть повыше. Но этот коллектив уже по праву входит в число пяти лучших в мире. Особенность Ядерных центров по сравнению с ФИАН заключается в том, что постановка новых экспериментов приходит от теоретиков, не привыкших делиться своими идеями с какими-то фабрикаторами – изготовителями мишеней. Причем часто задача ставится так, что надо подтвердить результаты расчетов.

В ФИАН при постановке опытов надо было уговорить всех исполнителей (лазерщиков, диагностов, мишеньщиков). Основной задачей считается найти расхождение между теорией и экспериментом для дальнейшей отработки теории. Характерен случай, который произошел у меня во время давнишнего посещения ВНИИТФ в г. Снежинске. Один из ведущих теоретиков центра Лыков завел со мной разговор о совместном эксперименте на их лазере по его идее. Когда я начал просить подробно объяснить в чем состоит предмет поиска, то получил ответ, что не ваше это дело. Я сказал, что мы в ФИАН так не работаем, на том все и кончилось.

Наша лаборатория из-за общего академического нищенского финансирования и отсутствия национальной программы создания лазера масштаба NIF постепенно сдает свои позиции. Мы пытаемся выжить за счет участия в международных проектах. По-прежнему на наши конференции с удовольствием приезжают ведущие специалисты лабораторий термоядерных мишеней из Америки, Европы и Азии, со многими из которых мы дружим и поддерживаем связи, обмениваясь письмами по электронной почте.

18. Заключение.

В ближайшие годы мир будет свидетелем газетных и телевизионных сообщений о мощных микровзрывах термоядерного горючего («зажигании») на лазерной установке NIF в США, о запуске лазерной установки LMJ во Франции, о физическом breakeven на лазерной установке «Omega-EP». При этом микровзрывы будут получены не на одном типе лазерных термоядерных мишеней, а на нескольких типах криогенных и некриогенных (каскадных – двухоболочечных) мишенях. NIF получит зажигание с применением прямого облучения мишеней и т.д.

Постепенно получение микрокритических масс термоядерного горючего и их «зажигание» станет рутинной работой экспериментаторов, которые будут стремиться к повышению доли сгоревшей DT-смеси. Теоретики наконец перестанут мучить

изготовителей мишеней введением различных слоев с добавками меди в стенку бериллиевой оболочки и слоев урана в слой золота конвертера лазерного излучения в мягкое рентгеновское излучение. Теоретики займутся поиском повышения коэффициента усиления энергии в мишени за счет введения в стенку мишени делящихся элементов или за счет замены не участвующих в выделении веществ (Be, C и пр.) на твердые вещества, участвующие в горении DT-смеси. Руководители научных программ – теоретики потребуют изготовления оболочек из твердых материалов, содержащих дейтерий и тритий (например, BeDT или NT₃BD₃) или мишеней, в которых DT-смесь используется только для зажигания, а горит дейтерий и пр. А это в свою очередь расширит фронт разработок изготовителей мишеней.

Возникнет новое направление работ, связанное с разработкой мишеней для частотных установок - прототипов будущих термоядерных реакторов. При этом не обязательно, что вначале потребуются «оптимальные» полимерные оболочки, с инженерной точки зрения было бы правильным дать возможность частотным установкам поработать со стеклянными оболочками, которые лучше подходят для изготовления и подачи в реакторную камеру, чем полимерные и тем более из бериллия, пары которого вызывает тяжелую болезнь.

В последние годы в ФИАН из описаний основных достижений института стали *для краткости* убирать фамилии. Это совершенно неверно. Можно назвать имя (фамилию) фиановца и само собой возникаю в памяти его (её) достижения. ФИАН это не только классы (школы) выдающихся ученых, а это коллектив, который сам по себе является школой со своими семинарами и конференциями, вычислительным центром и библиотекой. В этой школе практически каждый человек создатель. Порой от выдумки слесаря высшей квалификации зависит судьба изобретения или научной программы. Недаром же вождь говорил, что кадры решают всё.

В своей статье я хотел рассказать о том, как простые и красивые теоретические идеи при воплощении превращаются в тяжелую и напряженную работу экспериментаторов, но только на примере одной не самой большой ее части, в работу создания миниатюрных и очень сложных изделий для термоядерного взрыва – термоядерных мишеней. Я попытался рассказать о людях и их достижениях. Со всеми мне приходилось встречаться в течение почти 40 лет работы над технологией изготовления термоядерных мишеней. К сожалению, я спешил с окончанием обзора, т.к. у меня кончался 3х недельный отпуск, взятый для написания статьи. Отпуск подходит к концу, а статья еще не окончена, не отшлифована. Я не нашел высококачественных

фотографий коллег, с которыми я встречался и работал. Я пропустил часть работ и не упомянул коллег из других институтов, с которыми мы в ФИАН выполнили интересные разработки.

Но я хотел написать эту статью не столько для своих коллег, я хотел рассказать школьникам и студентам – физикам (среди которых уже мои внуки) как интересна и увлекательна научная работа. Это на всю жизнь гонка престижа тех, кто пытается своей головой пробить стену «незнания» на границе знание – незнание. Это ведь не только поиск фундаментальных законов мироздания, но и технические и технологические откровения, найденные в попытке сделать то, что никто до этого не сделал (или сделал, но не опубликовал). Сейчас в пору ИНТЕРНЕТА кажется, что все можно найти в сети, но это совершенно не так. Что-то надо сделать самому и, возможно, впервые.

С другой стороны, вспомним арабскую поговорку: «Был бы ослик, а мешок найдется».

Конечно, тех, кто решится заниматься исследованиями, ждет почет и уважение, но не бабло - большие деньги. Вспомните, как поет Фигаро в опере «Севильский цирюльник» уговаривая молодого человека: «Чести много, а денег мало». Но счастлив человек может быть и при ограниченном достатке, **наслаждаясь творческим трудом!** Такие же одержимые изобретательством, ваши отечественные и зарубежные конкуренты будут радостно обнимать вас при встрече на домашних или зарубежных конференциях, принимать вас дома и приглашать поработать вместе. Но они будут оставаться друзьями-конкурентами в интеллектуальной гонке престижа в науке.

Ну, если бедность одолеет, то можно поработать за рубежом.

P.S. Я понимаю, что многим трудно найти некоторые указанные мной первоисточники, поэтому в конце в Приложении даны ксерокопии наиболее труднодоступных (извините, только на английском языке, но все равно прочтите, получите наслаждение).

Текст статьи с **цветными** картинками я со временем выложу на сайте ФИАН <http://www.lebedev.ru>

18. References.

1. M. Gryzinski. Fusion Chain Reaction – Chain Reaction with Charged Particles. // *Physical Review*, (1958), Vol. 111, No 3, pp. 900-905.
2. А.С. Козырев. Газодинамический термоядерный синтез. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, 144 стр. (Рассекреченные предложения автора 1947 года). В Приложении дана копия письма 1978 г. А.С. Козырева с коллегами в журнал *Nature*, V. 275, No 5680.
3. Н.Г. Басов, О.Н. Крохин. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора. // *ЖЭТФ*, 1964, т. 46, с. 171-175.
4. F. Winterberg. Some Reminiscences about the Origins of Inertial Confinement. // *Fusion*. 1979, pp. 41-47.
5. F. Winterberg. The MIRV Concept and the Neutron Bomb. // *Fusion*. Oct. 1980, pp. 95-96. В Приложении дана копия этой заметки.
6. Н.Г. Басов, С.Д. Захаров, П.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский, С.В. Чекалин. Экспериментальное наблюдение нейтронного излучения при фокусировке мощного лазерного излучения на поверхность дейтерида лития. // *Письма в ЖЭТФ*, 1968, т. 8, №1, с. 26-31.
7. Н.Г. Басов, О.Н.Крохин, Г.В. Склизков, С.И. Федотов, А.С. Шиканов. Мощная лазерная установка для исследования эффективности высокотемпературного нагрева плазмы. // *ЖЭТФ*, 1972, т. 62, №1, с. 203-212.
8. Г.А. Аскарьян, В.А. Наймиот, М.С. Рабинович. Использование сверхсжатия вещества реактивным давлением для получения микрокритических масс лелеющегося вещества, получения сверхсильных магнитных полей и ускорения частиц. // *Письма в ЖЭТФ*, 1973, т. 17, №19, с. 597-600.
9. Творцы атомного века. Лев и атом. М. «Воскресенье», 2003, 440 с.
10. Н.Г. Борисенко, В.С. Бушуев, А.И. Громов, В.М. Дороготовцев, А.И. Исаков, В.Н. Е.Р. Корешева, Ю.А. Меркульев, А.И. Никитенко, С.М. Толоконников. // *Технология лазерных мишеней в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. // Квантовая электроника*, 1989, т. 19, №9, с. 1895-1899.
11. А.А. Акунец, Н.Г. Борисенко, В.С. Бушуев, А.И. Громов, В.М. Дороготовцев, А.И. Исаков, В.Н. Ковыльников, Е.Р. Корешева, Ю.А. Меркульев, А.И. Никитенко, И.Е. Осипов, В.В. Сутормин, С.М. Толоконников. *Технология лазерных мишеней в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. // Лазерные термоядерные мишени и сверхпрочные микробаллоны. Труды ФИАН, Т. 220, М., Наука, 1992, С. 3-26.*

12. N.G. Borisenko, A.A. Akunets, I.A. Artyukov, K.E. Gorodnichev, Yu.A. Merkuliev. X-ray tomography of the growing silicagel with density gradient. // Fusion Science and Technologies. 2009, V. 55, No4, May, pp. 477-483.
13. Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, О.Н.Крохин, Ю.А. Михайлов, Г.В. Склизков, С.И. Федотов. Генерация дейтерий- тритиевых нейтронов при сферическом нагреве твердой мишени излучением мощного лазера. // Квантовая электроника, 1974, т. 1, №9, с. 2069-2071.
14. S.A. Bel'kov, F.M. Abzaev, A.V. Bessarab, S.V. Bondarenko, V.A. Gadash, S.G. Garanin, G.V. Dolgoleva, N.V. Zhidkov, V.M. Izgorodin, G.A. Kirillov, G.G. Kochemasov, D.N. Litvin, S.P. Martynenko, Yu.A. Merkul'ev, V.M. Murugov, L.S. Mkhitar'yan, A.V. Pinegin, S.I. Petrov, V.T. Punin, A.V. Senik, N.A. Suslov et. al.. Study of high aspect ratio capsule in indirect-drive experiment at the ISKRA-5 facility. // Laser and Particle Beams, 1999, Vol. 17, No 4, pp. 591-602.
15. Н.Г. Басов, А.А. Ерохин, Ю.А. Захаренков, Н.Н. Зорев, А.И. Исаков, А.А. Кологривов, Ю.А. Меркульев, А.И. Никитенко, А.А. Рупасов, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов. Наблюдение сжатия двухкаскадных оболочечных мишеней, облучаемых лазером. Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 37, (10), С. 503-506. 28.
16. Н.Г. Басов, А.А. Галичий, А.Е. Данилов, А.И. Исаков, М.П. Калашников, Ю.А. Меркульев, А.В. Роде, Г.В. Склизков, С.И. Федотов. Экспериментальное наблюдение сжатия высокоаспектных оболочечных мишеней на установке "Дельфин". // Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 37, (2), С.102-104.
17. Н.Г. Борисенко, В.М. Дороготовцев, А.И. Исаков, Ю.А Меркульев, Ю.А. Михайлов, А.И. Никитенко, С.И. Федотов. Сверхрешетка микронеоднородностей в веществе лазерной мишени и устойчивость плазмы при сферическом сжатии. // Краткие сообщения по физике. ФИАН, Москва, 1987, (10), С. 9-11.
18. С.Ю. Гуськов, Ю.А Меркульев. Малоплотный поглотитель-конвертор в лазерных термоядерных мишенях прямого облучения. // Квантовая электроника. 2001, Т.31, №4, С. 311-317.
19. S. Eliezer, J.J. Honrubia, G. Velarde. Direct-indirect drive, a new possibility for laser induced fusion. // Physics letters A, 1992, v. A 166, pp. 249-252.
20. M. Tabak, D. Callahan-Miller. Design of a distributed radiator target for inertial fusion driven from two sides with heavy ion beams. // Physics of Plasmas, 1998, V. 5, No 5, pp. 1895-1900.

21. N. G. Borisenko, V. M. Dorogotvtsev, A. I. Gromov, S. Yu, Guskov, Yu. A. Merkul'ev, Yu. E. Markushkin, N. A. Chirin, A. K. Shikov, V. F. Petrunin. Laser targets of beryllium deuteride. // *Fusion technology*, V. 38, No 1, 2000, pp. 161-165.
22. N.G. Borisenko, Yu.A. Merkul'ev Microheterogenous laser targets for spherical plasma compression experiments. // Preprint FIAN No 47, 1990, 16 p.
23. N.G. Borisenko, I.V. Akimova, A.I. Gromov, A.M. Khalenkov, Yu.A. Merkuliev, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, J. Kuba, E. Krouscky, K. Masek, W. Nazarov, V.G.Pimenov, Regular 3-D networks with clusters for controlled energy transport studies in laser plasma near critical density. // *Fusion Sciences and Technology*, 2006, V. 49, #4, pp. 676-685.

Приложение.

Письмо А. С. Козырева с коллегами в журнал **Nature**

Fusion first for USSR

SIR.—A short report was published (*Nature* 269, 370; 1977) concerning the "generation of neutrons by thermonuclear fusion using a concentric explosion with an exceptionally high degree of symmetry". The results were obtained by the Polish group headed by Professor S. Kaliski and were announced at an international conference in Prague.

Similar results obtained in the Soviet Union were made public in 1958 by L. A. Artsymovich at the Second International Conference of the Peaceful Uses of Atomic Energy held in Geneva. (L. A. Artsymovich, *Controlled fusion research in the USSR; Proceedings of the Second United Nations International Conference of the Peaceful Uses of Atomic Energy*, 2298, 31, 1958).

As early as 1955, 10^9 neutrons per impulse were generated in our experiments (which were mentioned by L. A. Artsymovich) by focusing converging spherical shock waves on a UD_2 target. In 1963 for UD_2 and gaseous D_2 targets this number was increased to 3×10^{11} . The converging shock wave was formed by implosion of a spherical charge of explosive. In most of the experiments the external diameter of the design was about 70 cm, the mass of gaseous D_2 being about 3×10^{-4} g.

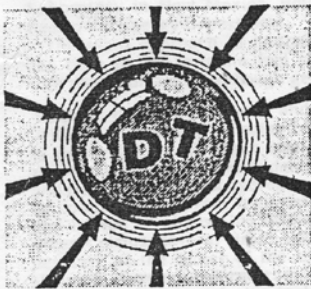
Yours faithfully,

A. S. KOZYREV
~~V. A. ALEKSANDROV~~
 N. A. POPOV

Leningrad, U.S.S.R

Статья в газете о ядерных испытаниях, с облучением термоядерной мишени потоком рентгеновского излучения от взрыва. (на 2 страницах)

A Step Toward Harnessing Fusion Energy



In a successful secret experiment, deuterium and tritium isotopes of hydrogen in a tiny pellet were bombarded with X-rays from an underground nuclear bomb test, heating and compressing them to great density.



The isotopes fused, producing helium and a burst of nuclear energy, identical to reactions in the sun and hydrogen bombs. The method has no practical use, but might help determine how fusion energy can be harnessed.

Source: Department of Energy

The New York Times/March 21, 1988

Secret Advance in Nuclear Fusion Spurs a Dispute Among Scientists

By WILLIAM J. BROAD

In top-secret experiments, Federal researchers have achieved one of the nation's most costly and elusive scientific goals: to ignite a nuclear fusion reaction in tiny pellets of hydrogen, producing powerful bursts of energy.

The success was achieved in unorthodox experiments some two years ago at the Government's underground nuclear test site in the Nevada desert, according to Federal scientists and officials, who spoke on the condition of anonymity. The results have triggered a bitter dispute over how the field of small-scale fusion should progress.

For decades, hundreds of American scientists have sought to tame nuclear fusion at a cost of more than \$2 billion. Advocates say the technique, if perfected, could be used by the 1990's to study nuclear physics, to develop antimissile weapons and, perhaps in the next century, to generate cheap, almost limitless electrical power.

Advance Viewed as Crucial

Although the secret ignition was achieved with a method that has no practical use, it is viewed as a crucial advance that will help determine the feasibility of harnessing small-scale fusion.

The secret ignition was attained in a departure from the nation's main strategy, which has attempted, without success, to use beams of concentrated light from giant laboratory lasers to ignite the reaction. Instead, fusion in tiny fuel pellets was triggered by a blast of radiation from an exploding nuclear weapon. Such secret experiments, which are believed to have never before been publicly disclosed, were conceived more than a decade ago as a way to assess the feasibility of the field, which is known as microfusion.

Some prototype fuel pellets, glass capsules filled with hydrogen isotopes, are so small that a dozen can easily fit on the head of a pin. Their power output could be equivalent to up to hundreds of pounds of high explosive.

In the fusion reaction, atoms are joined together to release the kind of energy that powers the stars and hydrogen bombs. In nuclear fission, by contrast, heavy atoms such as uranium are split apart to power atom bombs and nuclear reactors. The key question in microfusion is its practicality.

To the surprise of experts, the secret achievement in the Nevada desert required more energy than expected, triggering a clash among Federal scientists and Government officials over how to advance the \$160 million-a-year field. Disclosure of the result is also likely to encourage critics outside the Government who charge that microfusion is too formidable to ever be practical.

In the dispute, some scientists now assert that the nation's laser-based microfusion program needs a radical change of course in order to insure success. Other scientists vigorously disagree, saying the nuclear test was an unconventional but vital milestone that has demonstrated microfusion's feasibility and generated valuable data that will help make it practical.

Despite the discord, the secret success has generally elated fusion scientists who know of it.

In a tantalizing, little-noticed statement last September, Sheldon Kahalas, director of the nation's microfusion effort, run by the Federal Department of Energy, told a Princeton University conference that a top-secret effort code named "Cotton-on-Halite" had achieved results that marked a "historical turning point" for the fusion program. In response to questions, he refused to elaborate and he did not mention the role of underground nuclear tests.

However, he and other scientists at the Princeton conference said the nation was ready to start planning a full-scale laboratory microfusion facility, which they estimated would cost between \$500 million and \$1 billion.

"There's a new sense of excitement," William J. Hogan, a microfusion official at the Lawrence Livermore National Laboratory in California, said in an interview. "In the last two years, we've gotten almost all the data we wanted. That's remarkable. We kind of startled ourselves."

Scientists and officials quoted by name in this article spoke freely about the dispute and some of the implications of the secret tests, but they declined to discuss how the classified experiments were done. In general information concerning nuclear weapons and their design is classified secret because the Government wants kept such information which can have military uses out of foreign hands.

A Long Quest to Create Tiny Man-Made Suns

For decades, one of the fondest hopes of science has been constructive control of the energy of nuclear fusion, to create tiny, man-made suns. These miniature fireballs could be anywhere from hundreds of thousands to millions of times smaller than hydrogen bombs, making them tame enough for use in laboratories and reactors.

From modest beginnings in the early 1960's, the microfusion idea has grown into a sizable Federal program centered at the Government's main laboratories for the design of nuclear weapons: the Livermore laboratory in California and the Los Alamos National Laboratory in New Mexico. Both belong to the Energy Department.

The main approach to microfusion has been to try to ignite fuel pellets with powerful lasers, although genera-

tions of lasers have come and gone with no consensus developing on what is the best kind. To reach ignition, a tiny glass sphere filled with deuterium and tritium, isotopes of hydrogen, must be compressed to very high densities and heated to almost 100 million degrees Celsius, several times the temperature at the center of the sun. So stressed, it would undergo rapid thermonuclear reactions, fusing hydrogen into helium and giving off bursts of energy.

To lessen the difficulty of focusing multiple laser beams on a minuscule target, weapons scientists surround the fuel pellet with a metal case that converts coherent laser light into X-rays, which compress the target with great uniformity.

Despite considerable effort, no ignition has been achieved with these methods. The main problem has been lack of sufficient laser energy.

Today the nation's most energetic microfusion laser is Livermore's Nova, a \$200 million device bigger than a football field whose 10 beams can bombard a fuel pellet with some 100,000 joules of energy. A joule is roughly the energy of a flashlight switched on for one second.

In March 1986, an expert panel of the National Academy of Sciences said the energy needed for pellet ignition might prove to be as high as 10 million joules. It said an additional uncertainty was the minimum mass of fuel needed to achieve ignition.

In concert with such publicly known

Critics agree small-scale fusion poses formidable problems.

efforts and estimates, a top-secret Federal program, conducted jointly by Livermore and Los Alamos, has been underway for at least a decade to achieve microfusion ignition by harnessing the output of nuclear weapons, which can produce radiation more powerful than any laser's. The main output of nuclear weapons are X-rays, which are directed at the tiny fuel pellets.

Scientists Race to Design Full-Scale Laser Facility

After years of failures, the program achieved its initial success at ignition some two years ago, Federal scientists and officials said. What surprised some of them was how much energy it took, and how relatively large the tiny fuel pellets had to be in order to achieve ignition.

The exact numbers of both the amount of energy required and the size of the pellets are secret. But the energy needed for a laboratory laser to mimic the classified achievement would be in the range of 100 million joules, or ten times what the National Academy of Sciences said might be necessary, experts familiar with the experiments said. Moreover, subsequent nuclear tests at lower energy levels failed, although some Federal scientists are confident these will eventually succeed.

The data sent scientists racing to design a full-scale laser facility. So too, the Energy Department last year began to plan what it calls a Laboratory Microfusion Facility.

But the nuclear success has triggered a bitter clash over how to achieve microfusion. At issue is whether to press ahead with lasers and targets in the range of five to 10 million joules, or to shift to include lasers big enough to mimic the conditions of the underground achievement. Experts agree that the current generation of microfusion lasers are unsuited for producing such high energies, the cost being prohibitive.

At Los Alamos, secluded high in the mountains of New Mexico, two physicists have championed the high-energy approach and won favorable review from eight colleagues appointed to evaluate its merits. But the laboratory's senior management, saying budgets are too tight to pursue the novel and unproven scheme, has ordered work on it to cease and has laid off one of the two scientists.

The aim of the disputed idea is to build a giant laser running on hydrogen and fluorine gas. These chemicals combine explosively, much like rocket fuel, producing heat and light that can be converted into laser beams. Indeed, hydrogen-fluoride lasers are common. The novel twist, which has undergone some testing, is to extract the chemical energy very rapidly, in billionths of a second, by triggering its combustion with intense beams of electrons. In theory, such a laser, if large enough, could deposit 100 million joules of energy on a target.

The scientists behind the idea, P. Leonardo Mascheroni and Claude R. Phipps, said it deserved serious study and suggested that resistance to it, stems from an over zealous commitment to the status quo. "It's a cultural thing," said Dr. Mascheroni, a native of Argentina who was recently laid off after nine years at Los Alamos. "They don't want to admit something different."

Los Alamos officials said budget cuts have forced many layoffs, and that Dr. Mascheroni's ideas have been found wanting. "There was nothing so compelling that we thought we should drop the approach we're taking now," said John E. Browne, head of defense programs at Los Alamos.

Despite official resistance, the hydrogen-fluoride proposal was favorably reviewed by an eight-person Los Alamos panel chaired by Gregory H. Canavan, a respected senior scientist who formerly headed the Energy Department's microfusion effort. After deliberating two months, the Canavan panel in February 1987 recommended that four to six scientists work on the idea for a year. The fundamental attraction, the panel said, was that the giant laser, if found feasible, would be 10 to 20 times cheaper to build than conventional rivals pushed to the 100-million-joule range. The success of the venture, it concluded, "could bring the energies that may be required for fusion experiments."

Current Effort Defended Despite the Problems

Today, Los Alamos says the idea's merits are not great enough to divert scarce funds from the laboratory's current microfusion effort, which centers on a \$60 million krypton-fluoride laser that to date has generated only 25 joules. Although the laboratory admits the laser has problems, it says the de-

vice will eventually produce 10,000 joules.

Moreover, Federal scientists in charge of microfusion said ignition would be achieved at energy levels far below 100 million joules, based on calculations derived from secret tests.

"We view that classified data as saying you don't have to have as much of a driver as people thought," said Dr. Hogan of the Livermore laboratory, adding that the data "pretty well confirms our opinion" that five to ten million joules are sufficient to achieve ignition.

At Energy Department headquarters, Dr. Kahalas, director of the national program, defended the laser efforts at Los Alamos as "reasonable" and at Livermore as "excellent." He added that if higher-energy drivers were ever deemed necessary, other candidates would probably be considered in addition to hydrogen-fluoride lasers.

Weapons scientists agree that microfusion could be used to study the physics and effects of nuclear weapons, to perfect nuclear-powered antimissile arms such as the X-ray laser, and to power futuristic reactors to generate electricity.

Dr. Mascheroni, the former Los Alamos physicist, argued that the field was so important that the nation needed an insurance policy in case the conventional wisdom was wrong. He said he hoped the dispute would trigger a new National Academy of Sciences review of microfusion, and a Congressional inquiry into the field's management.

But an Energy Department official insisted that the program was healthy and showing considerable promise.

"It has had what I would call an enormous success," said Dr. Kahalas, director of the national effort. "There's no way I can tell you about a classified program. But we think we're very close to showing this thing is feasible."

Military Science

**The MIRV
Concept
And the
Neutron Bomb**

by Dr. Friedwardt Winterberg

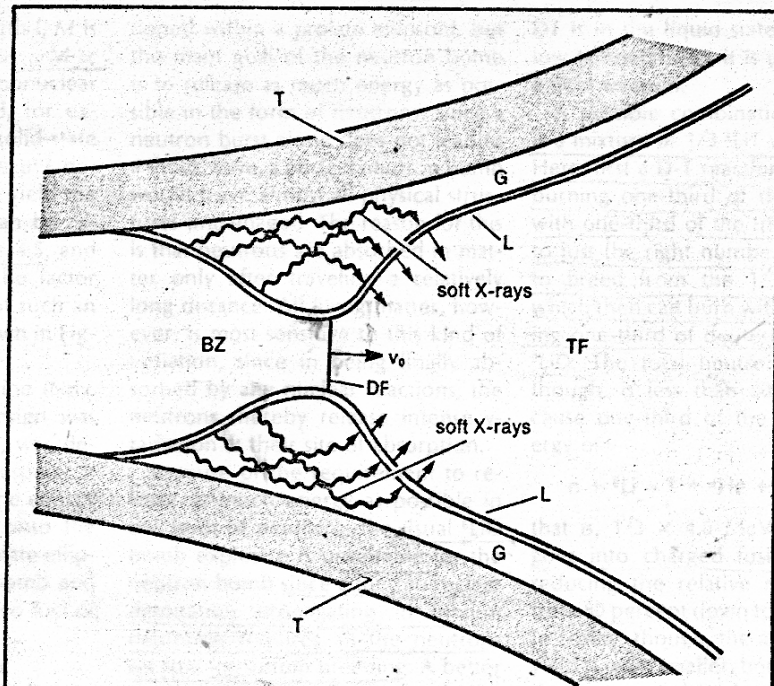


Figure 1
AUTOCATALYTIC DETONATION PRINCIPLE
In an autocatalytic thermonuclear detonation wave, soft X-rays travel through the gap G between the dense metal liner L and the outer tamp T, ahead of the thermonuclear burn zone BZ. TF is the thermonuclear fuel and DF is the detonation front, which moves with velocity v_0 .

Some time ago I described the principle underlying the ignition of a fission-triggered thermonuclear explosive device (*Fusion*, Nov. 1979, p. 41). The purpose of that article was not to be sensational but, rather, to help demystify the alleged "secret" surrounding the hydrogen bomb as an example of ordinary textbook physics.

In this field there are secrets only for the layman, not the professional scientist. Secrecy is often imposed by a government to generate a false feeling of security by spreading the belief that it is in the possession of secret knowledge. I have never believed that it can serve any purpose to keep physics facts that can be obtained from any college textbook a "secret." I have never been exposed to any scientific "secrets" and reject any claims that there are such secrets known only to a few chosen people. The public should know the basic principles underlying these concepts without which a rational disarmament discussion is impossible.

There are two concepts that are at the focus of these disarmament discussions. One is the MIRV concept, and the other is the neutron bomb. Let us discuss both.

In the MIRV concept not only one but a whole cluster of thermonuclear bombs is put on top of an intercontinental rocket. This fact by itself suggests that for space-saving reasons the bombs have the shape of long, hexagonal rods. Each of these deadly pencil-like rods is equipped with its own inertial guidance system and small, solid-fuel rockets for trajectory control, enabling it to find its separate predetermined target. However, the special design of slender H-bombs makes a large thermonuclear yield possible only if the H-bomb employs the autocatalytic detonation principle.

Autocatalytic Detonation

I discussed this principle in the context of thermonuclear microexplosions some time ago (F. Winterberg, *Atomkernenergie*, 32:2, 1978, p. 85).

In this concept, a precursor of soft X-rays is set free behind the thermonuclear detonation front and moves ahead of this front along a cylindrical channel in between the still unignited fuel and some outer tamp. This photon precursor precompresses the thermonuclear fuel by ablative implosion prior to its ignition in passing through the front of the detonation wave. The principle is explained in Figure 1, which is taken from my above-mentioned paper.

The energy that is set free inside a thermonuclear detonation wave propagating along a rodlike H-bomb is proportional to three factors: the mass M of the rod, its density ρ , and the rod radius r .

This dependence can be easily understood: Because the thermonuclear reaction rate is proportional to ρ^2 , the energy set free in a rod of length l is proportional to $\rho^2 r^2 l$, where $\tau \approx r/v$ is the disassembly time, with v the radial thermal-expansion velocity. The yield is thus proportional

to ρrM . For a fixed rod length l , M is proportional to ρr^2 and thus $\rho rM \propto \rho^{1/2} M^{3/2}$. If now the thermonuclear explosive is precompressed, for example to about 20 times its solid-state density, it follows from the $\rho^{1/2}$ dependence that for the same yield the amount of the explosive can be reduced by the factor $\sqrt{(20)} = 4.5$, and the radius of the rod by the factor $\sqrt{(4.5)} \approx 2.2$. The principle of such an autocatalytic H-bomb is shown in Figure 2.

In the *Progressive* magazine (Nov. 1979) a similar H-bomb design was published, which, however, was deficient in one important respect. It ignored the need to focus the energy from the fission explosive onto the thermonuclear fuse by a prolate ellipsoid, wherein the atomic bomb and fuse are positioned in the two foci of the ellipsoid.

The Neutron Bomb

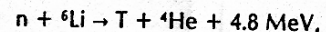
The neutron bomb is a small thermonuclear weapon. The ignition here, of course, is also accomplished by an exploding fission bomb posi-

tioned within a prolate ellipsoid, but the main goal of the neutron bomb is to release as much energy as possible in the form of neutrons. Since a neutron burst alone does not lead to a shock wave, a perfect neutron bomb would leave almost all physical structures undamaged. The reason for this is that neutrons are absorbed in matter only after traveling a relatively long distance. All living matter, however, is most sensitive to this kind of radiation, since in being finally absorbed by any nuclear reactions, the neutrons thereby release intense γ -radiation at their site of absorption.

Because of the requirement to release as much energy as possible in the form of neutrons, the usual ${}^6\text{LiD}$ bomb explosive is unsuitable for the neutron bomb since a thermonuclear detonation propagating in lithium deuteride requires all the neutrons set free for tritium breeding. A better neutron bomb explosive would be liquid deuterium-tritium (DT). Here, about 80 percent of the energy released goes into neutrons. But since

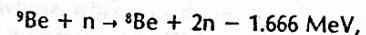
DT is in the liquid state only at very low temperatures, it is unsuitable for a field weapon.

A possible combination, however, is a mixture of $1/3 {}^6\text{LiT}$ with $2/3 {}^7\text{LiD}$. Here, first a D-T reaction takes place, burning one-third of the deuterium with one-third of the tritium, leading to just the right number of neutrons to breed from the $1/3 {}^6\text{Li} - 1/3 \text{T}$, which then can burn with the remaining one-third of deuterium from the ${}^7\text{LiD}$. The total neutron yield here, though, is less than 80 percent because one-third of the reaction energy of



that is, $1/3 \times 4.8 \text{ MeV} = 1.6 \text{ MeV}$, goes into charged fusion products, reducing the relative neutron yield from 80 percent down to 74.4 percent. In reality, though, the actual neutron yield is even smaller, because some of the neutrons that should breed tritium are lost from the assembly by diffusion.

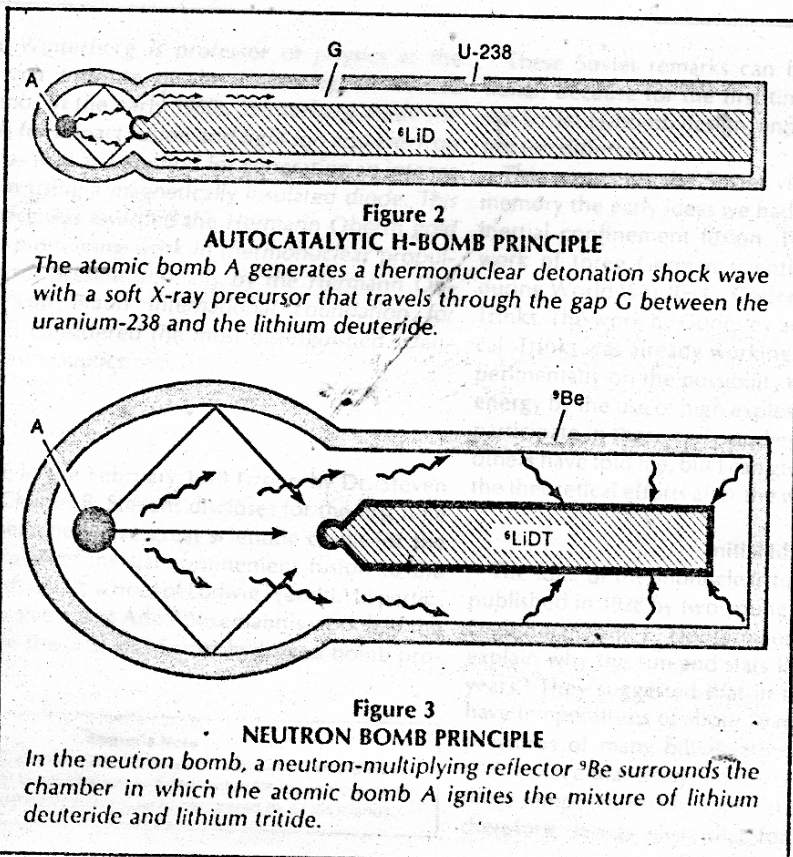
These losses can be largely compensated for if one surrounds the assembly with a neutron-multiplying reflector. U-238, however, is unsuitable for this purpose since it has a large nonneutron fission yield and thus could substantially reduce the relative neutron yield. A substance better suited for this purpose is ${}^9\text{Be}$, undergoing the reaction



with ${}^9\text{Be}$ spontaneously decaying into two α -particles under the delivery of 0.096 MeV. The reaction is thus endothermic. Figure 3 shows the principle of such a neutron bomb.

In neither the MIRV nor the neutron bomb have I shown how the fission trigger is assembled into a supercritical state. This is done by special conventional high-explosive techniques, on which I shall report sometime in the future.

Dr. Winterberg, professor of physics at the Desert Research Institute of the University of Nevada in Reno, is a pioneer in fusion research. In 1978 he received the Hermann Oberth gold medal for his work in thermonuclear propulsion.



Фотографии сотрудников лаборатории термоядерных мишеней ФИАН



Часть сотрудников группы термоядерных мишеней в 1980 году: нижний ряд слева направо В.В. Сутормин, С.М. Толоконников, А.И. Никитенко, Е.Р. Корешева верхний ряд В.М. Дороготовцев, Ю.А. Меркульев, А.А. Акунец, Р.Н. Трактирников, В.С. Бушуев



Ю.А. Меркульев



А.А. Акунец



И.В. Александрова



Н.Г. Борисенко



В.С. Бушуев



А.И. Громов



В.М. Дороготовцев



Е.Р. Коршева



А.И. Никитенко



И.Е. Осипов



С.М. Толоконников



А.С. Орехов и
Л.А. Борисенко

Оглавление

1. Введение.	3
2. От уточнения параметров критической массы к тому, каким способом ее достичь.	6
3. Микрокритические массы делящихся веществ и конструкции, совмещающие синтез и деление.	14
4. Первые эксперименты с лазерными термоядерными оболочечными мишенями и уточнение требований к параметрам мишеней.	17
5. Несколько слов о нобелевских лауреатах по физике и мании величия.	30
6. Технология изготовления термоядерных мишеней для лазеров с энергией до 10 кДж.	34
7. Хранение водорода в стеклянных микробаллонах при давлении до 2000 атм. Небольшой зигзаг.	55
8. Технология изготовления термоядерных мишеней для лазеров с энергией до 300кДж.	63
9. DT-смесь в виде твердого слоя на внутренней поверхности оболочки - криогенные мишени.	69
10. Контракты с зарубежными научными центрами и наши конференции.	76
11. Многоканальные лазеры и проблема сглаживания интенсивности излучения на поверхности капсулы с DT-смесью. Непрямые мишени.	91
12. Прямые–непрямые термоядерные мишени. Мишени для тяжело-ионного синтеза.	101
13. Оболочки – мишени с дейтерием или DT-смесью в стенке оболочки. Альтернативные топлива.	105
14. Можно ли турбулентность в плазме заставить выполнять полезную работу? (Идеи создания поверхностного натяжения и вязкости в плазме за счет наночастиц тяжелых металлов).	108
15. В ожидании экспериментальной демонстрации взрыва микрокритической массы на мощных лазерах и Z-пинчах.	113
16. О возможности построения энергетических реакторов, национальные и международные проекты.	117
17. О современном состоянии лабораторий мишеней в разных странах.	122
18. Заключение.	124
18. Литература	127
Приложение.	129
Фотографии сотрудников лаборатории термоядерных мишеней ФИАН	134