

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ИАЭ им. И.В. КУРЧАТОВА В 1965—1968 гг.

*Обзор*¹

М.К. Романовский

КОНФЕРЕНЦИЯ В НОВОСИБИРСКЕ (1—7 АВГУСТА 1968 г.)

Это была третья Международная конференция по физике плазмы и управляемому ядерному синтезу (первая в 1962 г. в г. Зальцбурге (Австрия), вторая в 1965 г. в Калэме (Англия)). В трудах конференции названы фамилии 385 участников из 20 стран, 12 участников от Евратома и один представитель Интернационального союза чистой и прикладной физики (в обзоре [1] указано «700 делегатов и гостей...»). Опубликованы 125 докладов (из них 3 обзорных) и короткое выступление Г.И. Будкера — в то время директора ИЯФ СО АН СССР, на территории которого проходила конференция. Двадцать докладов по два объединены в репортерские. Доклады были от 10 стран. СССР и США представили более чем по 30 докладов, Англия и ФРГ — более чем по 10, Франция — 10, остальные страны — от шести до одного. СССР не дал ни одного доклада по мультипольным тороам и θ -пинчам, но много (8) по ВЧ-нагреву, удержанию и стабилизации. США не дал докладов по мультипольным тороам, но дал много по стеллараторам (6) и в секции, объединившей теорию торов, лазерный нагрев и Астрон (6). Правда, само формирование по секциям не кажется совсем удачным, но все же отражает направленность интересов физиков. Токамаками занимались только в отделе Л.А. Арцимовича в ИАЭ, а полученные на них результаты были настолько лучше, чем на любой другой системе, что они были восприняты с большим недоверием.

¹ Продолжение. Начало обзора в ВАНТе. Сер. Термоядерный синтез, 2002—2007 гг., 2008 г., вып. 1, 3.

В работе Л.А. Арцимовича и др. [2] указано: T_e до 2000 эВ, T_i до 300 эВ, τ_i до 10 мс (т.е. в ~ 50 раз превышает бомовское время), n до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Один из делегатов США М. Готлиб в течение, по крайней мере, часа пытался доказать автору обзора, что данные по температуре (T_e и T_i) ошибочные, приводя возможные причины ошибок, и, хотя на все замечания получил, по-моему, убедительные ответы, я не уверен, что он изменил свою точку зрения. Реально Новосибирская конференция оказалась «звездным часом» токамаков, хотя признание пришло только через год — на конференции в Дубне.

Начнем с обзорного доклада Л.А. Арцимовича [3]. Автор рассмотрел практически все работы по замкнутым системам. Проанализировал работы на стеллараторах — «...к сожалению, все же не удастся составить достаточно определенную картину процессов, от которых зависит удержание плазмы в стеллараторах», работы на мультипольных системах — «...не удалось установить однозначные закономерности, связывающие время удержания с геометрией магнитного поля», работы на аксиально-симметричных системах, отметив существование на установке «Зета» (Англия) «спокойной» фазы, в течение которой время удержания плазмы во много раз превышает бомовское время. В «спокойной» фазе возникало тороидальное магнитное поле обратного направления вне токового канала, но шир сохранялся везде, что и обеспечивало устойчивость. Объяснение этому дал только в семидесятых годах Тейлор — такое поле возникает в результате релаксации и состояния с минимальной энергией при сохранении интегральной спиральности. Теперь (1991 г.) это серьезно изучаемое направление «Пинч с обращенным магнитным полем» (RFP — revers field pinch). Автор [3] остановился на результатах, полученных на токамаках, сделав важный вывод, что термоизоляция плазмы не ухудшается с ростом температуры и плотности.

Дальше аннотируем работы в последовательности их публикации в сборнике трудов конференции.

В работе [4] М.В. Бабырин и Г.Е. Смолкин экспериментально изучали бесстолкновительные ударные волны (на установке, описанной в [5]) и турбулентный нагрев при аннигиляции встречных магнитных полей на установке «Димпол», кратко описанной в [4]. Показано, что за фронтом волны температура электронов T_e достигает 100 эВ, что авторы объясняют коллективными процессами, различными при разных числах Маха—Альфвена. По турбулентному нагреву авторы сделали два вывода: при плотности ниже критической аннигиляция магнитных полей происходит очень быстро и сопровождается нагревом электронов, в плазме развиваются коллективные процессы и колебания на частотах до 100 МГц и в диапазоне до $2 \cdot 10^{10}$ Гц.

Работа Л.А. Арцимовича и др. [2] формально не привлекла особого внимания (в дискуссии выступили всего 3 человека, но в кулуарах о ней говорили много). Опираясь на большой экспериментальный материал (19 страниц, 13 графиков), полученный в опытах, в основном, на установках Т-3 и ТМ-3, авторы пришли к заключению: «При достаточно высокой напряженности продольного магнитного поля можно в настоящее время получать плазму с концентрацией порядка $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, электронной температурой до 0,7 кэВ, максимальной ионной температурой до 0,5 кэВ (в водороде). При этом плазменный шнур обладает высокой устойчивостью (время жизни заряженных частиц в оптимальных условиях превышает, по-видимому, 20 мс. Полученные результаты позволяют с уверенностью рассчитывать на то, что в рамках программы Токамак удастся продвинуться значительно дальше и выйти на уровень ионной температуры порядка киловольта и выше при временах удержания энергии, измеряемых десятками долями секунды». Эти предсказания оправдались.

В работе Л.С. Соловьева и др. [6] исследована устойчивость плазмы в замкнутых системах: с круглым сечением магнитных поверхностей (с круговой магнитной осью (токамак), рейстрек, восьмерка Спидера); с некруглым сечением магнитных поверхностей (токамак с эллиптическим, D-образным, вытянутым вдоль оси симметрии, «заостренным», вытянутым вдоль большого радиуса сечением; винтовой тор; двухзаходный стелларатор; трехзаходный стелларатор). Авторы широко используют свои работы [6—9] и ряд работ зарубежных авторов. В дискуссии участвовали 2 человека. Работа А.И. Морозова [12] в большей части представляет обзор теоретических и экспериментальных работ, выполненных, в основном, в соавторстве (теоретических с К.В. Брушлинским, Л.И. Соловьевым, А.П. Шубиным, экспериментальных — с большой группой сотрудников). В докладе дана теория, приведены схемы «двухлинзового» ускорителя с замкнутым дрейфом (стационарный плазменный ускоритель), коаксиального ускорителя с собственным магнитным полем, магнитоплазменного компрессора, изложены результаты опытов с

СПУ, работавшим на азоте. В заключение автор предлагает «пролетотрон» — термоядерный реактор в виде прямой трубы с однородным полем, в котором инжектируется плазма так, чтобы при входе в трубу существенная часть продольной энергии перешла в поперечную. За время пролета должно произойти достаточно много термоядерных реакций (при длине плазменного шнура 80 м, диаметре 0,3 см, а $T_e = T_i = T = 15$ кэВ и скорость плазмы 10^8 см/с, напряженность магнитного поля $5 \cdot 10^5$ Э.) Все хорошо, только плазму с такой скоростью и температурой так и не удалось получить. Автор ссылается на работы [13—16] и ряд других. К сожалению, список литературы составлен крайне небрежно — некоторые ссылки просто неверные (нет названий работы в указанном месте, даются две ссылки на один том журнала, а в нем есть 3 статьи тех же авторов (номера страниц не указаны) и т.д. В дискуссии выступил один человек.

Работа В.И. Агафонова и др. [17] существенно развивает работы [18—21]. Опыты проводились на установке, описанной в [20], и ее модификации: увеличили диаметр анода до 66 см и емкость батареи до 576 мкФ (130 кДж). Как и в предыдущих работах, очень хорошая диагностика — осциллографирование тока J (и отдельно в приосевой области с помощью специальной вставки), напряжения U ; измерения выхода нейтронов (урановые пластинки с β -счетчиками и сцинтилляционные детекторы); выход рентгеновского излучения — фотографирование свинцовой камерой-обскуры и развертка по времени и т.д. Анализ экспериментальных данных и сопоставление их с теоретическими расчетами по одномерной цилиндрически симметричной нестационарной модели В.Ф. Дьяченко и В.С. Имшенника показали существенное значение характеристики поперечных размеров (двухмерность из-за потери массы). С некоторым учетом двухмерности и выбранных из эксперимента начальных условий оценено положение плазменного фокуса (расстояние ~ 1 см от анода при диаметре ~ 1 мм) и сделано предположение о двойном источнике нейтронов. Детально исследовано рентгеновское излучение, определена величина осевой скорости плазмы $\sim 10^8$ см/с. В дискуссии участвовали два человека.

Работа Р.П. Васильевой и др. [22] посвящена изучению плазменного фокуса, образующегося за срезом коаксиального инжектора. Установка описана в работе [23]. В диагностике широко использованы электронно-оптические камеры (фотографии: в свете отдельных спектральных линий, интерференционных картин (интерферометр Фабри—Перо с неонгелиевым лазером ($\lambda = 628 \text{ \AA}$) в качестве осветителя), спектрограмм, масс-спектрограмм (специально дооборудован масс-спектрограф Томсона); проводили стандартные электротехнические измерения и использовали магнитные зонды. Авторы установили существование ряда режимов работы коаксиального ускорителя, когда за торцом ускорителя образуется область сжатой горячей плазмы, температура и плотность в которой на порядки величины больше, чем в межэлектродном зазоре, а время ее существования во много раз превышает время ее полета отдельными частицами. Уменьшение начальной массы резко увеличивает температуру и плотность в области сжатия. Дискуссии не было.

В работе Б.Б. Кадомцева и О.П. Погуце [24] рассмотрена циклотронная неустойчивость плазмы в адиабатических ловушках с учетом неоднородности магнитного поля и плазмы. Авторы показали, что из-за продольной неоднородности магнитного поля возможно развитие неустойчивости «отрицательной массы», при этом дано очень наглядное объяснение природы этой неустойчивости и ее связи с циклотронными колебаниями, проявляющимися в виде поверхностных волн, бегущих в сторону вращения ионов. Эффект сброса плазмы авторы обсуждают в конце доклада, связывая его с нелинейными эффектами, и делают вывод, что изложенные теоретические представления в целом ряде пунктов качественно соответствуют экспериментальным данным на установке ПР-5.

В работе В.И. Арефьева и др. [25] в приближении двухкомпонентной газодинамики электронов и ионов рассмотрены неустойчивости, вызываемые сильным током, текущим поперек магнитного поля. Показано, что возможно развитие неустойчивостей с инкрементом, существенно большим, чем у дрейфовых неустойчивостей. Рассмотрены неустойчивость трубчатого пинча, мелкомасштабная неустойчивость (результаты успешно сравнены с опытами на установках типа «Зета»). В ходе доклада авторы отмечают особенности своей работы по сравнению с [26—32] и другими (список лит. — 21 назв.). В дискуссии приняли участие два человека.

Работа Ю.Т. Байбородова и др. [33] посвящена исследованию на установке ПР-6 дрейфово-конусной неустойчивости в предположении, что она ответственна за быстрый спад плотности, наблюдавшейся в

[34, 35]. ПР-6 отличается от ПР-5 (описанной в [36]) только большей напряженностью магнитного поля (до 25 кЭ в пробках). Продольное пробочное отношение $G_{||}$ «можно менять от 1,6 до 2,4 при постоянном $G_{\perp} = 1,2$. Инжекция плазмы — из неустойчивого плазменного пучка [35], давление (до инжекции) $P_0 = (1,5—2)10^{-8}$ торр. Диагностика: плотность n определялась с помощью интерферометрии на $\lambda = 8$ мм по поглощению пучка тепловых атомов калия; энергетический спектр ионов — методом фольг [37] и по потоку нейтралов; электронов — с помощью многосеточного электростатического анализатора; давление — быстродействующим манометром. Анализ совокупности опытов показал: «...Дрейфово-конусная неустойчивость не обнаруживается, несмотря на то, что согласно предсказаниям теории она должна была бы иметь место».

В работе А.В. Бортникова и др. [38] с помощью набора антенн фазометра (остальная диагностика обычная) на установке АС [39] изучено возникновение и развитие ионно-циклотронной неустойчивости, вызываемой наличием положительной производной у функции распределения быстрых ионов по поперечной энергии. Колебания распространяются в виде бегущих косых волн. Результаты опытов хорошо совпали с теоретическими расчетами. Дискуссии не было.

Работа Б.И. Канаева и Е.Е. Юшманова [40] проведена на установке ПР-5, и в ней изложены результаты опытов, проведенных после конференции в Стокгольме (1967 г., [41, 42]). С помощью системы узко коллимированных зондов определено распределение быстрых ионов в ловушке. Электрическими зондами-антеннами определили сдвиги фаз сигналов, установили наличие бегущих волн в азимутальном направлении, синфазность в продольном направлении и их связь с тремя типами вспышек ВЧ-излучения [42]. Магнитным петлевым зондом измерено азимутальное и продольное магнитное поле. Авторы весьма подробно обсуждают полученные результаты и делают ряд выводов: волны периферийные и не являются косой электронно-ленгмюровской волной; вероятно, колебания представляют собой поперечные (к магнитному полю) электростатические ионные волны; источником энергии периферийных волн все же служит центральная плазма.

В работе К.Б. Карташева и др. [42] изучали ионно-циклотронную неустойчивость в сгустке плазмы, связанную с анизотропией функции распределения ионов по скоростям. Авторы теоретически показали, что в сгустке, свободно расширяющемся вдоль магнитного поля, возникает анизотропия скоростей ионов, приводящая к возникновению ионно-циклотронной неустойчивости. Эта неустойчивость уменьшает анизотропию, но продольное расширение сгустка ее восстанавливает, снова возникает анизотропия, и процесс повторяется, что приводит к уменьшению «поперечной» температуры ионов. Предварительные опыты, проведенные на установке «Инес» с диаметром плазмоведа 30 см и длиной 220 см, при ведущем поле до 4 кЭ показали, что они «не противоречат выводам теории, предсказывающей развитие в сгустке циклотронной неустойчивости». Дискуссии не было.

В работе [43] В.В. Аликаев и др. изучали электронно-циклотронный нагрев в адиабатической ловушке, нагрев плотной плазмы при параметрическом резонансе $\omega_H/\omega_r = 0,5$ [44, 45] и нагрев ионно-гибридными волнами. В докладе приведены схемы соответствующих установок, полученные результаты и сделаны выводы: в адиабатической ловушке получена плазма с $T_e \approx 30$ кэВ при плотности $n \approx 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³, с временем жизни $\tau \approx 1$ мс; обнаружена неустойчивость; показана возможность получения плазмы с $\beta \approx 0,2$ при большой плотности; в опытах с ионно-гибридными волнами обнаружено снижение добротности резонатора при наличии плазмы, которое нельзя объяснить столкновительным поглощением. Дискуссии не было.

В работе Н.А. Борзунова и др. [46] описано развитие работ [47—49] по динамической стабилизации пинча и работы [50] по воздействию бегущей волны на тороидальный шнур плазмы. По динамической стабилизации проведено много опытов на установках с параметрами, изменяемыми во много раз (геометрия, время, токи), и установлено: плазма устойчива 5—10 мкс и при нарушении теоретического критерия устойчивости, а разрушение шнура, по-видимому, связано с накоплением у стенок атомов примесей. В опытах с бегущей волной установка несколько изменена: использовали и две бегущие навстречу волны, но при этом хотя и исчезают колебания, но резко увеличивается скин-слой (до ~ 1 см), становящийся по существу некоторой переходной областью. Очень существенно влияние примесей со стенок. В дискуссии участвовало три человека.

В работе В.В. Арсенина и др. [51] описана экспериментальная проверка возможности стабилизации желобковой неустойчивости с помощью системы обратных связей на установке «Огра-2» [52]. Опыты

проведены очень тщательно и показали, что предложенная в [53] (см. также [54]) система обратных связей позволяет подавить первый мод $m = 1$ желобковой неустойчивости, по крайней мере, в разреженной плазме ($n \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$) в простой пробочной геометрии. Остающиеся при этом потери плазмы обусловлены ионно-циклотронной неустойчивостью.

Работа Е.К. Завойского и др. [55] по существу является продолжением и расширенным обзором экспериментальных работ, выполненных группами сотрудников, работавших под руководством Е.К. Завойского (и часто с его непосредственным участием, [56—63] и ряд других работ). Опыты на прямых адиабатических ловушках (плотность плазмы $n = 10^{12}—4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, магнитное поле $H_0 = 1—25 \text{ кЭ}$) показали, что турбулентный нагрев не связан с возбуждением в плазме пучка электронов с энергией, сравнимой с приложенной к плазме разностью потенциалов, энергосодержание плазмы растет с напряженностью магнитного поля H (по крайней мере до $H \approx 10 \text{ кЭ}$), основная энергия прямого разряда (до 70%) выделяется на аноде, остальная почти полностью передается плазме. В замкнутой геометрии изучали разряды в установке, описанной в [65], гофрированным магнитным полем и сделан вывод, что в таком тороиде можно удерживать турбулентную нагретую плазму, а механизм нагрева качественно тот же, что и в простом торе [59, 60]. В дискуссии участвовали два человека.

В докладе А.Г. Плахова и др. [65] описаны эксперименты и дано теоретическое обоснование нагреву электронов при прохождении пучка электронов через холодную плазму в пробкотроне с большим пробочным отношением $R = H_n/H_0 = 5.2$. Начальная плотность холодной плазмы $n_0 = (1—2)10^{12} \text{ см}^{-3}$ при температуре 5—10 эВ. Плотность горячих электронов $n_r = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, энергия до 200 кэВ (напряжение на инжекторе пучка $V_0 = 35 \text{ кэВ}$) и зависит от длительности инъекции пучка, поперечных размеров плазмы и напряженности магнитного поля. Горячие электроны быстро расширяются поперек магнитного поля, и в это время растет их энергия, но средняя плотность остается постоянной при увеличении объема более чем в 10 раз. С ростом пучка сильно возрастает скорость расширения. Авторы делают вывод: «Ток пучка определяет диффузию магнитного поля, а энергия электронов пучка определяет плотность горячей плазмы». Теоретическое объяснение дал Д.Д. Рютов, приняв, что из пучка «выбивается» 1—3% электронов (механизм «выбивания» остается неизвестным), вне пучка развиваются ленгмюровские колебания и нагрев электронов обусловлен их взаимодействием с этими колебаниями (холодная плазма является средой, в которой распространяются колебания). Теоретическое объяснение удовлетворительно согласуется с экспериментами. Дискуссии не было.

Доклад М.В. Незлина [66] является обзором работ автора [31, 35, 67—70] по изучению дрейфовой неустойчивости пространственно неоднородной плазмы (дрейфово-пучковой неустойчивости). Весьма интересно «Введение и сводка результатов теории», где автор, используя результаты теоретических работ [71—77] и др., убедительно обосновывает возможность и целесообразность своих экспериментов. Результаты экспериментов согласуются с теорией.

В работе Б.Б. Кадомцева и А.М. Стефановского [78] дан обзор материалов конференции в Новосибирске. Авторы отметили: «Наиболее характерная особенность конференции — заметно возросший уровень понимания физических процессов в плазме». Затем они осветили работы на тороидальных системах, отметили успехи токамаков (высокие параметры плазмы, время жизни частиц существенно больше боровского, и термоизоляция плазмы не ухудшается с ростом температуры и плотности); период улучшенной стабильности плазмы на «Зета» (тогда не объясненный, сегодня — основа исследований Пинчей с обратным магнитным полем («Помп», REP, Revers field Pmch)). Отметили опыты с плазмой низкой плотности в ИЯФ СО АН СССР, где получили классическую зависимость времени удержания плазмы τ от напряженности магнитного поля H ($\tau \sim H^2$). Довольно подробно обсудив работы с тороидальными мультипольными системами (в СССР таких работ не было), авторы пришли к выводу о поведении плазмы в замкнутых ловушках, многое в этих экспериментах еще остается неясным, несмотря на значительный прогресс в понимании отдельных явлений, и привели некоторые возможные объяснения, связав их с отдельными теоретическими работами. Перейдя затем к обсуждению работ по открытым ловушкам, авторы отметили роль циклотронной неустойчивости, ограничивающей плотность плазмы ($n = (2—3)10^9 \text{ см}^{-3}$). Далее авторы привели методы улучшения устойчивости, в частности, доклад [79], но оговорили, что метод создания плазмы путем инъекции быстрых атомов создает принципиально неустойчивую плазму, и удастся ли с этим справиться, «пока не очень ясно». Авторы отметили результаты

работы [33] и работы на установке ДСЧ-2 (США), показавших отсутствие дрейфово-конусной неустойчивости, но подчеркнули: «Нет оснований сомневаться в существовании этой неустойчивости». Затем кратко описали работы по плазменному фокусу и перешли к θ -пинчам, уделив им довольно много внимания: отметили разницу между сжатием плазмы в плазменном фокусе [17] и магнитоплазменном компрессоре [12]. Обсудив работы по ударным волнам, спокойной плазме (θ -машины), по исследованию нелинейных волн, авторы отметили, «что в понимании физических процессов при взаимодействии пучков с плазмой достигнут существенный прогресс». Обзор [78] довольно подробный (8 с.), написан простым, «доходчивым» языком.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

В течение 1966—1968 гг. существенных изменений в организации работ по термоядерным исследованиям не произошло. В ОПИ ИАЭ им. И.В. Курчатова был создан (по существу восстановлен) сектор С-43 (начальник С.Ю. Лукьянов), организованы самостоятельная группа плазмодинамики (начальник А.И. Морозов), реально входящая в состав 0-38, самостоятельная группа В (начальник С.П. Максимов), введенная в состав С-40, и при этом же секторе оформлены группа металловедческих исследований (начальник Ю.И. Коннов) и группа изотопных мишеней (начальник В.С. Романов). Лаборатория ионной бомбардировки (начальник В.М. Гусев) переименована в сектор С-36. В С-49 отдела «О» созданы лаборатория инъекции ионов (начальник Г.Ф. Богданов) и лаборатория инъекции нейтралов (начальник Д.А. Панов). По существу это было организационное оформление уже реально действовавших направлений работ.

В это время за рубеж выезжали 14 человек (на 70% больше, чем за предыдущие 3 года) — в США, Англию, Францию, Польшу, Румынию, Чехословакию. С Институтом физики плазмы Чехословакии проведен небольшой обмен (по 3 чел.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 10 лет до начала Новосибирской конференции были рассекречены работы по УТС. Что же наиболее интересного произошло за это время?

Конечно, само рассекречивание работ, показавшее, что «ученые думают одинаково» — исходные идеи, направление разработок, даже устройства и конструкции установок оказались часто практически одинаковыми, хотя и были некоторые заметные различия. Пожалуй, в первую очередь это стеллараторы... Вопрос: «А что произойдет, если соединить концы рейстрекка «накрест»? (но, правда, несколько натянутой аналогии с лентой Мэбиуса), — не заинтересовал ни Л.А. Арцимовича, ни М.С. Леонтовича, причем последний решил, что задача топологическая, и обратился к математикам (как он и сказал автору обзора). А математики, видимо, сочли задачу неинтересной — ответа мы не получили и на Вторую конференцию вышли с рисунком «восьмерки» без какого-либо ее анализа, чем, естественно, задела ее американского автора, во многом (хотя и не во всем) разобравшегося. У нас не было и θ -пинчей, в США не было «Жанра-0». Как же развивались события дальше? У нас начали изучать стеллараторы (в основном в ХФТИ и ФИАН, в ИАЭ соорудили небольшой у Е.К. Завойского, но работу быстро свернули). θ -пинчами у нас практически нигде не занимались (только в СФТИ изучали θ -пинч).

Адиабатические ловушки изучали в Англии, США, Франции и у нас. Самым существенным было экспериментальное подтверждение принципа « $\min B$ » группой под руководством и с непосредственным участием М.С. Иоффе, за что ему и присудили премию «Атом для мира», а у нас дали группе сотрудников (М.С. Иоффе, Ю.Т. Байбородов, Б.Б. Кадомцев, Р.И. Соболев и др.) Государственную премию.

По системам с замкнутыми магнитными поверхностями пути исследований различались: кроме сектора Н.А. Явлинского (а после его трагической гибели сектора Л.А. Арцимовича) и работ сектора И.Н. Головина, везде изучали разные модификации стеллараторных систем. Английская установка «Зета» довольно быстро была закрыта, как и ее аналог в НИИЭФА — установка «Альфа». В секторе (отдел «О») И.Н. Головина основными были адиабатические ловушки (тороидальными системами занималась лишь небольшая группа сотрудников).

Как уже говорилось, результаты токамаков на конференции в Новосибирске приняли с большим недоверием...

По списку участников конференции можно установить организации, заинтересованные в получении информации о состоянии термоядерных исследований, а пролистав доклады, установить организации, работающие в этом направлении. Из США приехали представители 25 научных организаций, из СССР 13 (хотя и проводилась конференция у нас), из Японии 7, из Нидерландов, ФРГ, Франции по 5, из Англии 4. Доклады представили 16 организаций из США, 10 из СССР, 4 из Японии, 3 из Франции, по 2 из Англии, ФРГ, Нидерландов, Италии. В обоих списках не учтены представители администрации. Существенно, что из США было много (10) представителей университетов. От СССР был представлен только МГУ им. М.В. Ломоносова.

Интересно посмотреть, как изменилось отношение к работам советских ученых за эти 10 лет? Вероятно, это можно сделать, сравнив цитируемость отечественных работ в докладах на конференциях: в Женеве в 1958 г., когда рассекретили все работы по УТС, и в Новосибирске — это была уже 3-я Международная конференция по физике плазмы и управляемому синтезу. Если в 1958 г. зарубежные ученые почти не знали наши работы, то к 1968 г. ситуация существенно изменилась: из 88 докладов, сделанных зарубежными учеными в Новосибирске, в 55 приведены ссылки на советские работы (и не только статьи, но и некоторые препринты ИАЭ и ИЯФ СО АН (правда, единицы). Всего ссылок 1108 (их больше, чем в списках литературы к статьям, так как в некоторых списках под одним номером указаны несколько работ, например, в докладе CN-24/I-2 под номером 4 в списке названо 11 статей), из них 150 — на советские работы (13%, а в 1958 г. было значительно меньше): работы сотрудников ИАЭ — 73, сотрудников ИЯФ СО АН — 22, представлены ЛФТИ, ХФТИ, СФТИ, ФИАН, цитируемых «чисто теоретических работ» больше половины, но многие содержат описание эксперимента и соответствующую теоретическую часть, и определить, что же интересовало иностранных ученых, — часто нереально. Большая часть работ — коллективные (в том числе и теоретических), так что назвать «наиболее цитируемого автора» тоже нельзя. Можно определить наиболее часто встречающиеся фамилии (лично и в соавторстве): Р.З. Сагдеев — в 22 работах, Б.Б. Кадомцев — в 16 работах, А.А. Галеев — в 12 работах, Л.С. Соловьев — в 7 работах. Это все теоретики, у каждого немало «личных» работ, но многие в соавторстве (например, у Р.З. Сагдеева — 7 работ совместно с А.А. Галеевым, у Б.Б. Кадомцева — 7 работ совместно с О.П. Погуце и т.д.). Еще сложнее с экспериментаторами — вероятно, справедливо было бы говорить о группах ученых и их руководителей: М.С. Иоффе — открытие ловушки, Л.А. Арцимович — токамаки, группа И.Н. Головина — «Огра», группа Е.К. Завойского — турбулентный нагрев, магнитный звук. Ссылок мало — группы Е.К. Завойского и И.Н. Головина — по 4 ссылки, группа М.С. Иоффе — 2 ссылки, группа Л.А. Арцимовича — 1 ссылка (конечно, без учета работ теоретиков по этим направлениям). Правда, и представлено было мало докладов: токамаки — 1, турбулентный нагрев — 2, открытые ловушки — 1 (без учета работ о неустойчивости, характерной для открытых ловушек). Больше всего советские ученые представили докладов на секцию J (ВЧ-нагрев, удержание и стабилизация) — всего 12, из ИАЭ — 3. В секции G (удержание нейтральным газом, неустойчивости и волны) из 16 докладов 5 были отечественные, все из ИАЭ. Много докладов было на секции ε (дрейфовые волны, нелинейные явления), но отечественный доклад всего один — из Института физики АН УССР, Киев. Доклады на этих секциях составляли 25% от всех докладов, но вдвое меньшую часть от отечественных (13%), что можно объяснить отсутствием наших докладов в секциях G (мультиполя) и K (θ-пинчи) — таких работ в СССР не вели, а зарубежных докладов было больше 20. Следует отметить, что само разделение по секциям вызывает у автора обзора серьезные сомнения. Например, все работы по плазменному фокусу и работа по циклотронному резонансу собраны в секции G, другие работы по циклотронной неустойчивости — в секции H (открытые ловушки); работа по дрейфовой неустойчивости попала в секцию ε, а не в секцию L и т.д., хотя это, конечно, не принципиально. Существенно то, что зарубежные ученые знали работы советских ученых, а личный авторитет Л.А. Арцимовича, М.А. Леонтовича и Б.Б. Кадомцева стал весьма большим. Сборники «Вопросы теории плазмы» за рубежом издавали очень быстро, практически одновременно с выходом их в СССР. Обзоры докладов на Международных конференциях по УТС поручали нашим ученым: 1961 г., Зальцбург — «Обзор по экспериментальным работам» сделал Л.А. Арцимович; 1965 г., Калэм — «Обзор теоретических изысканий» сделал Б.Б. Кадомцев; 1968 г., Новосибирск — «Обзор по замкнутым плазменным системам» сделал Л.А. Арцимович. На Международный семинар в Триесте (1964 г.) в качестве лекторов были приглашены М.С. Иоффе, Б.Б. Кадомцев, Р.З. Сагдеев.

За эти 10 лет было издано 10 книг отечественных авторов по физике плазмы и ее диагностике (не считая пяти томов «Вопросов теории плазмы»). Это уже упоминавшиеся книги авторов из ИАЭ: книги Д.А. Франк-Каменецкого «Плазма — 4-е состояние вещества» (вышло 3-е издание), Л.А. Арцимовича «Управляемые термоядерные реакции» (вышло два издания), не упоминавшиеся В.Д. Русанова «Современные методы исследования плазмы» (Госатомиздат, 1962 г.), А.А. Веденова «Теория турбулентной плазмы» (Институт научной информации АН СССР, 1965 г.), М.К. Романовского «Введение в физику плазмы» (МИФИ, 1968 г.), Д.А. Франк-Каменецкого «Лекции по физике плазмы» (Атомиздат, 1968 г.). Тиражи книг В.Д. Русанова (6500 экз.), М.К. Романовского (2500 экз.), А.А. Веденова (1500 экз.) небольшие, но быстро разошлись, к физике плазмы был интерес не только у специалистов. В начале 1960-х годов была некая «эйфория» — вот-вот ученые решат задачу создания устройства, дающего неограниченное количество энергии. Да и сами ученые были настроены довольно оптимистично: на конференции в Женеве (1955 г.) индийский ученый Хоми Баба (он открывал конференцию) ответил корреспондентам, что для решения этой проблемы нужно 20 лет, а в 1958 г. подтвердил: «Прошло 3 года, значит 17 лет». На конференции в Зальцбурге (1961 г.) Л.А. Арцимович был несколько осторожнее: «Вряд ли могут быть какие-нибудь сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена». Но М.Н. Розенблют (США) был более конкретен: «Я верю, что человечество имеет весьма большие шансы через каких-нибудь 20 лет разрешить проблему УТС, если до этого оно не потерпит поражения в еще более трудной борьбе с неуправляемым синтезом». На более поздних конференциях такого оптимизма уже не было: на конференции в Калэмэ (1965 г.) Л. Спитцер (США) сказал: «Приблизились ли мы к цели, движение к которой многие из нас начали с такими большими надеждами много лет назад, а именно к высвобождению энергии УТС на благо человечества? Я думаю, что ответ на этот вопрос будет простым и ясным — мы не знаем». Б.Б. Кадомцев ограничился утверждением: «Мне кажется, что теория в настоящее время развита настолько, что уже готова приняться за объяснение экспериментальных данных, и в ближайшие годы мы, вероятно, будем свидетелями объединения теории и эксперимента в единую науку — физику плазмы».

На конференции в Новосибирске (1968 г.) все авторы обзорных докладов (Л.А. Арцимович, С. Бушбаум (США), М. Трошери (Франция) отметили чисто научные достижения, причем наиболее сильно сказал М. Трошери: «Мы теперь владеем прочной физической базой для исследования термоядерного слияния». Правда, Г.И. Будкер в «Заключительном слове» призвал: «Количества накопленных знаний о плазме достаточно, чтобы те, кто связан с этой проблемой, переключили своё внимание на создание термоядерного реактора, а новые идеи появятся в ходе работы».

Что же — он был оптимистом. Прошло еще более 20 лет, а новых идей так и нет (1992 г.) — но не следует забегать вперед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомцев Б.Б., Стефановский А.М. 3-я Международная конференция по физике плазмы и УТС. — Атомная энергия, 1969, т. 26, вып. 1, с. 47.
2. Арцимович Л.А., Бобровский Г.А. и др. Экспериментальные исследования на установках Токамак. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 1, с. 172.
3. Арцимович Л.А. Обзор по замкнутым плазменным системам. — Там же, с. 3.
4. Бабыкин М.В., Смолкин Г.Е. Структура бесстолкновительных ударных волн и диссипация сильных переменных магнитных полей в плазме. — Там же, с. 129.
5. Загородников С.П., Смолкин Г.Е. и др. Разрушение фронта прямых магнитозвуковых ударных волн в разреженной плазме при больших числах Маха. — ЖЭТФ, 1967, т. 52, вып. 5, с. 1178.
6. Соловьев Л.С., Шафранов В.Д., Юрченко Э.И. Об устойчивости плазмы в замкнутых системах. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 1, с. 175.
7. Соловьев Л.С., Шафранов В.Д. Замкнутые магнитные конфигурации для удержания плазмы. — Вопросы теории плазмы, 1967, вып. 5, с. 3.
8. Соловьев Л.С. К теории гидромагнитной устойчивости тороидальных плазменных конфигураций. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 2 (8), с. 626.
9. Соловьев Л.С. Гидромагнитная устойчивость плазмы в квазиоднородном магнитном поле. — Там же, вып. 6 (12), с. 2063.
10. Шафранов В.Д. Желобковая неустойчивость криволинейного токового шнура плазмы. — Ядерный синтез, 1968, т. 8, вып. 3, с. 253.
11. Кадомцев Б.Б., Погуце О.П. Турбулентные процессы в тороидальных системах. — Вопросы теории плазмы, 1967, вып. 5, с. 209.

12. **Морозов А.И.** Стационарные плазменные ускорители и перспективы их применения в термоядерных исследованиях. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 3.
13. **Морозов А.И.** Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях. — ДАН, 1965, т. 163, № 6, с. 1363.
14. **Морозов А.И., Шубин А.П.** Течение плазмы между электродами, обладающими слабой продольной проводимостью. — Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, вып. 6, с. 827.
15. **Трубников Б.А., Явлинский Ю.Н.** Торможение медленных протонов в металлах. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 1, с. 253.
16. **Чириков Б.В.** Фокусировка интенсивного электронного пучка в ускорительной трубке. — ЖТФ, 1965, т. 35, № 12, с. 2202.
17. **Агафонов В.И., Голубчиков Л.Г. и др.** Исследования нецилиндрического Z-пинча при токах свыше 1 МА. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 21.
18. **Андрьянов А.М., Базилевская О.А. и др.** Исследование импульсного разряда в дейтерии при скоростях нарастания тока до 10^{12} и напряжениях до 120 кВ. — В сб.: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т. 4, с. 182.
19. **Филиппов Н.В., Филиппова Т.И. и др.** Плотная высокотемпературная плазма в области нецилиндрической кумуляции Z-пинча. Доклад на конф. по УТС в Зальцбурге (1961). — Приложение к журналу «Ядерный синтез», 1962, т. 2, с. 577.
20. **Филиппов Н.В., Филиппова Т.И. и др.** Явления, сопровождающиеся образованием плотного плазменного фокуса при кумуляции нецилиндрического Z-пинча. Доклад на конференции в Калэме (1965). — В сб.: Физика плазмы и исследования в области УТС. Т. 2. — Вена, 1966, с. 405.
21. **Михайловский А.Б.** Желобковая неустойчивость аксиально-симметричной плазмы с конечным ларморовским радиусом ионов. — Ядерный синтез, 1964, т. 4, вып. 2, с. 108.
22. **Васильев Р.П. и др.** Исследование плазменного фокуса коаксиального инжектора. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 39.
23. **Аретов Г.Н., Пергамент М.И. и др.** Структура и генерация плазменных сгустков в коаксиальном инжекторе с улучшенными электротехническими параметрами и вакуумными условиями. — В кн.: Труды 6-й Международной конференции по ионизационным явлениям в газах. Т. 3. — Париж, 1963, с. 419.
24. **Кадомцев Б.Б., Погуце О.П.** Циклотронная неустойчивость и сбросы плотности плазмы в адиабатических ловушках. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 125.
25. **Арефьев В.И., Гордеев А.В. и др.** Неустойчивости, вызываемые в плазме током, текущим поперек удерживающего магнитного поля. — Там же, с. 165.
26. **Сагдеев Р.З.** Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме. Доклад на конференции в Калэме (1965). В сб.: Физика плазмы и исследования в области УТС. Т. 4. — Вена, 1966, с. 20.
27. **Загородников С.П., Рудаков Л.И. и др.** Наблюдение ударных волн в бесстолкновительной плазме. — ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 5(11), с. 1717.
28. **Моисеев С.С., Сагдеев Р.З.** Об ударных волнах в разреженной плазме в слабом магнитном поле. — ДАН, 1962, т. 149, вып. 2, с. 329.
29. **Леонтович М.А.** Обобщение формул Крамерса—Кронига на среды с пространственной дисперсией. — ЖЭТФ, 1962, т. 40, вып. 3, с. 907.
30. **Lehnert V.** Basic Features of Plasma Instabilities. Report Trite-EPP-72-23. Королевский технологический институт. 100.44. Стокгольм, 07.10.1972.
31. **Незлин М.В., Солнцев А.М.** Неустойчивый плазменный пучок. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 5, с. 1237.
32. **Горелик Л.Л., Синицын В.И.** Новые трехслойные болометры для измерений энергетических потерь плазмы. — ЖТФ, 1964, т. 34, вып. 3, с. 505.
33. **Байбородов Ю.Г., Готт Ю.В. и др.** Эксперименты по удержанию плазмы на установке ПР-6. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 213.
34. **Готт Ю.В., Иоффе М.С., Юшманов Е.Е.** Накопление плазмы с горячими ионами на установке ПР-5. — Вена: МАГАТЭ, 1966, т. 1, с. 35.
35. **Незлин М.В., Солнцев А.М.** Ускорение ионов в плазменных пучках. — ЖЭТФ, 1963, т. 45, вып. 4(10), с. 840.
36. **Иоффе М.С., Соболев Р.И.** Удержание плазмы в ловушке с комбинированным магнитным полем. — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 5, с. 366.
37. **Готт Ю.В., Тельковский В.Г.** Анализатор энергетического спектра ионов в высокотемпературной плазме. — ЖТФ, 1964, т. 34, вып. 12, с. 2114.
38. **Бортников А.В., Бревнов Н.Н. и др.** О структуре волн в плазме, создаваемой инжекцией быстрых ионов. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 311.
39. **Бортников А.В., Бревнов Н.Н. и др.** Измерение пороговой плотности при возникновении ионно-циклотронной неустойчивости плазмы с горячими ионами. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1278.
40. **Канаев Б.И., Юшманов Е.Е.** Исследование ионно-циклотронной неустойчивости на установке ПР-5. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 319.
41. **Байбородов Ю.Т., Иоффе М.С. и др.** Ионно-циклотронная неустойчивость в адиабатической ловушке с $\text{Min } B$. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 2(8), с. 513.
42. **Карташов К.Б., Пистуневич В.И. и др.** Исследование ионно-циклотронной неустойчивости в плазменном сгустке. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 335.
43. **Аликаев В.В., Арсеньев Ю.И. и др.** Применение высокочастотных полей для нагрева плазмы. — Там же, с. 381.

44. Арсеньев Ю.И., Глаголев В.М. и др. Эксперименты по взаимодействию плазмы с электромагнитным полем объемного резонатора. Доклад на конф. по УТС в Зальцбурге (1961). — Приложение к журналу «Ядерный синтез», 1962, т. 2, с. 687.
45. Головин И.Н. и др. О работах на термоядерной установке «Огра». — УФН, 1961, т. 73, вып. 4, с. 685.
46. Борзунов Н.А., Левадный Г.В. и др. Исследование взаимодействия плазмы с высокочастотным магнитным полем, возрастающим к периферии. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 497.
47. Осовец С.М. Динамическая стабилизация плазменного витка. — ЖЭТФ, 1960, т. 39, вып. 2(8), с. 311.
48. Орлинский Д.В., Осовец С.М. и др. Динамическая стабилизация плазменного шнура. — Вена: МАГАТЭ, 1966, т. 2, с. 313.
49. Орлинский Д.В. Взаимодействие прямого плазменного шнура с переменным магнитным полем квадрупольной конфигурации. — Атомная энергия, 1965, т. 18, вып. 4, с. 323.
50. Бреус С.Н., Курдюмов В.Н. и др. Взаимодействие высокочастотной электромагнитной бегущей волны с плазмой на установке «Дельта-2». — Вена: МАГАТЭ, 1966, т. 1, с. 537.
51. Арсенин В.В. и др. Подавление желобковой неустойчивости плазмы с помощью обратных связей. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 515.
52. Артеменков Л.И., Васильев Р.П. и др. Получение горячей плазмы на установке «Огра-2» с инъекцией в магнитную ловушку быстрых атомов водорода. — Вена: МАГАТЭ, 1966, т. 2, с. 45.
53. Арсенин В.В., Чуянов В.А. О возможности стабилизации желобковой неустойчивости плазмы с помощью системы обратных связей. — ДАН, 1968, т. 180, № 5, с. 1078.
54. Арсенин В.В., Чуянов В.А. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости моноэнергетического электронного пучка с помощью обратных связей. — ЖТФ, 1968, т. 36, вып. 12, с. 2106.
55. Завойский Е.К., Недосеев С.Л. и др. Турбулентный нагрев плазмы током. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 679.
56. Кован И.А., Смирнов В.П. и др. Турбулентный нагрев плазмы в тороидальных ловушках и исследование косых магнитозвуковых волн большой амплитуды. — В кн.: Труды 6-й Международной конференции по ионизационным явлениям в газах. Т. 2. — Париж, 1963, с. 481.
57. Бабыкин М.В., Гаврин П.П. и др. Турбулентный нагрев плазмы током прямого разряда. — Вена: МАГАТЭ, 1966, т. 2, с. 851.
58. Демидов Б.А., Елагин Н.И. и др. Аномальное сопротивление и сверхвысокочастотное излучение плазмы в сильном электрическом поле. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 2, с. 454.
59. Демидов Б.А., Елагин Н.И. и др. Поиски комбинационного рассеяния электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне на турбулентной плазме. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 12, с. 533.
60. Завойский Е.К. Коллективные взаимодействия и проблема получения высокотемпературной плазмы. — Атомная энергия, 1963, т. 14, вып. 1, с. 57.
61. Бабыкин М.В., Завойский Е.К. и др. Наблюдение двухпотоковой ионной неустойчивости при турбулентном нагреве плазмы. — ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 5(11), с. 1976.
62. Галеев А.А., Моисеев С.С., Сагдеев Р.З. Теория устойчивости неоднородной плазмы и аномальная диффузия. — Атомная энергия, 1963, т. 15, вып. 6, с. 451.
63. Готт Ю.И., Тельковский В.Г. К определению времени жизни высокотемпературной плазмы по длительности нейтронного излучения. — ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 3(9), с. 831.
64. Шафранов В.Д. Компенсация баллонной моды неустойчивости плазмы в тороидальных системах. — ЖЭТФ, письма, 1967, т. 6, вып. 2, с. 975.
65. Плахов А.Г., Рютов Д.Д. и др. Исследование механизма пучкового нагрева плазмы в пробкотронах. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 709.
66. Незлин М.В. Дрейфовая неустойчивость немаксвелловской плазмы. — Там же, с. 763.
67. Незлин М.В. и др. Длинноволновые электронные колебания в системе пучок—плазма. — ЖЭТФ, 1966, т. 50, вып. 2, с. 349.
68. Незлин М.В., Солнцев А.М. Предельные токи и электрон-ионные колебания в квазинейтральных электронных пучках. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 2(8), с. 437.
69. Незлин М.В. О природе трехступенчатой неустойчивости плазменного пучка. — Там же, вып. 4(10), с. 1180.
70. Незлин М.В., Трубников А.С. и др. Пороги пучковых неустойчивостей. — Там же, 1968, т. 55, вып. 2(8), с. 397.
71. Будкер Г.И. Релятивистский стабилизированный электронный пучок. — Атомная энергия, 1956, № 5, с. 9.
72. Велихов Е.П. Устойчивость границы плазма—вакуум. — ЖЭТФ, 1961, т. 31, вып. 2, с. 180.
73. Веденов А.А., Велихов Е.П. Устойчивость плазмы. — УФН, 1961, т. 73, вып. 4, с. 701.
74. Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в магнитном поле. — Вопросы теории плазмы, 1963, т. I, с. 7.
75. Михайловский А.Б. Колебания неоднородной плазмы. — Там же, т. III, с. 141.
76. Михайловский А.Б. К теории устойчивости пространственно-неоднородного тока в плазме. II. Волны с частотой выше ионно-циклотронной. — Там же, с. 1945.
77. Бабыкин М.В., Гаврин П.П. и др. Турбулентный нагрев. — ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 2(8), с. 411.
78. Кадомцев Б.Б., Стефановский А.М. III Международная конференция по физике плазмы и УТС. — Атомная энергия, 1968, т. 26, вып. 1, с. 47.
79. Арсенин В.В., Чуянов В.А. и др. Подавление желобковой неустойчивости плазмы с помощью обратных связей. — В сб.: Доклады на Интернациональной конференции по УТС. Новосибирск, 1968, т. 2, с. 515.

(Продолжение следует)