

нарных систем магнитного удержания плазмы. Работа над такими системами позволила бы передать накопленный в физике плазмы опыт новому поколению, которому и предстоит завершение того важнейшего дела создания основ безопасной энергетики будущего, фундаментальный вклад в которое внес Лев Андреевич Арцимович.

## Список литературы

1. Арцимович Л А и др., in *Plasma Phys. and Control. Nucl. Fusion Res.* (Proc. 3d Int. Conf. Novosibirsk 1968) Vol. 1 (Vienna: IAEA, 1969) p. 17
2. Peacock N J et al. *Nature* (London) **224** 488 (1969)
3. Тамм И Е, в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Под ред. М А Леонтовича) Т. 1 (М.: Изд. АН СССР, 1958) с. 3
4. Сахаров А Д, в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Под ред. М А Леонтовича) Т. 1 (М.: Изд. АН СССР, 1958) с. 20
5. Jonson J L et al. *IEEE Transactions on Plasma Sciences* **PS-9** 142 (1981)
6. Spitzer L *Phys. Fluids* **1** 253 (1958)
7. Брагинский С И, Шафранов В Д, в сб. *2-я Международная конференция по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958* Т. 1 *Доклады советских ученых* (М.: Изд. ГУ по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959) с. 221
8. Lomas P on behalf of the JET Team Preprint JET-P (97)46 17 (1997)
9. McGuire K M et al. *Phys. Plasmas* **2** 2176 (1995)[9] JT-6[9]
10. Кадомцев Б Б *Основы физики плазмы токамака* (Итоги науки и техники. Физика плазмы, Т. 10, Ч. 1, Под ред. В Д Шафранова) (М.: Изд. ВИНТИ, 1991); Kadomtsev V B *Tokamak Plasma: A Complex Physical System* (Bristol: Institute of Physics Publ., 1992)
11. Морозов А И, Савельев В В *УФН* **168** 1153 (1998)
12. Griger G et al. "Physics Studies for Helical-axis Advanced Stellarators" (Proc. 12th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Res., Nice, 1988) *Nucl. Fus. Suppl.* **2** 369 (1989)
13. Nuehrenberg J, Zille R *Phys. Lett. A* **129** 113 (1988)
14. Исаев М Ю, Михайлов М И, Шафранов В Д *Физика плазмы* **20** 357 (1994)
15. Boozer A H *Proc. Plasma Physics and Controlled Fusion Supplement* **11A** A103 (1995)
16. Shafranov V D, Mikhailov M I, Skovoroda A A, Subbotin A A "Pseudosymmetric Magnetic Confinement Systems", 1997 Int. Symposium on Plasma Dynamics in Complex Electromagnetic Fields, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Research Report 193 (1998)
17. Monticello D A et al. "Physics Considerations for the Design of NCSX" *Proc. 25th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. Prague, 1998*
18. Isaev M Yu, Cooper W A, Medvedev S Yu et al. "Plasma stability in Helic-like Quasi-helically Symmetric Stellarators" *Nuclear Fusion* **37** 1431 (1997)
19. Shafranov V D, Mikhailov M I, Skovoroda A A "Quasisymmetrical Stellarators and Mirrors" (International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement Novosibirsk) *Fusion Technology* **35** 67 (1988)

PACS number: **01.65. + g**

## Ленинградские физтеховцы в токамачной команде Льва Андреевича Арцимовича (1962 – 1973 гг.)

М.П. Петров

Волею судьбы в начале 60-х годов небольшая группа ленинградских физтеховцев оказалась вовлеченной в исследования на токамаках в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова под руководством Л.А. Арцимовича. Это произошло благодаря следующему обстоя-

тельству. К тому времени у нас в ленинградском физтехе был разработан новый многообещающий метод диагностики горячей плазмы, основанный на анализе потока выходящих из плазмы атомов. Метод использовал тот факт, что в любой, даже очень горячей водородной плазме, которая, казалось бы, должна быть полностью ионизованной, существует небольшая фракция нейтральных атомов водорода, находящихся в тепловом равновесии с ионами. На возможность такого явления впервые указал А.Д. Сахаров при расчетах тороидального термоядерного реактора с магнитным удержанием [1]. "Эти атомы, — писал Сахаров, — должны возникнуть в плазме из-за эстафетной перезарядки нейтрального водорода, поступающего внутрь плазмы со стенок камеры". Сахаров отметил также, что фракция атомов будет очень небольшой и не сможет оказать существенного влияния на энергобаланс плазмы, но, тем не менее, заметный поток атомов будет выходить из плазмы на стенку. После публикации расчетов Сахарова на это явление обратил внимание другой крупнейший физик, тогдашний директор ФТИ Б.П. Константинов. Он предложил использовать свободно выходящие из плазмы атомы для диагностики ионов и измерения ионной температуры плазмы, так как энергетические распределения атомов очень близки к распределениям ионов. Надо заметить, что проблема измерения ионной температуры плазмы в то время стояла очень остро. Практических решений ее не просматривалось. На основе предложения Б.П. Константинова в ФТИ в лаборатории проф. Н.В. Федоренко под руководством В.В. Афросимова в 1958 – 1960 гг. была создана аппаратура для регистрации атомов, испускаемых плазмой (так называемые атомные анализаторы) и разработана методика получения энергетических распределений ионов из измеренного потока атомов [2]. К началу 60-х годов этот метод был успешно опробован на легендарной ленинградской термоядерной установке "Альфа", и результаты были представлены на конференции МАГАТЭ в Зальцбурге в 1961 г. [3]. Работа [3] вызвала в Зальцбурге большой интерес. Это и привело к тому, что у нас в ФТИ возникла мысль использовать новую диагностику на токамаках, исследования на которых бурно разворачивались тогда под руководством Л.А. Арцимовича в Москве. Предложение ФТИ было с готовностью принято, и группа ленинградцев, в составе которой был и автор этого сообщения, оказалась в отделе у Арцимовича.

Отношение Льва Андреевича к нам определялось в основном двумя факторами. Во-первых, это был большой интерес с его стороны к новому методу диагностики плазмы. Во-вторых, Лев Андреевич сам был в прошлом физтеховцем. Именно в ФТИ он сформировался в крупного ученого-физика. Поэтому все, связанное с ленинградским физтехом, вызывало априори его живейший интерес. К тому же данный случай способствовал установлению помимо административно-организационных связей (Л.А. был уже тогда академиком-секретарем ООФА) прямого научного сотрудничества с ФТИ, что Лев Андреевич очень ценил.

Впервые я увидел Льва Андреевича в конце 1962 г. на семинаре в секторе токамаков (сектор 44), которым после трагической гибели Н.А. Явлинского стал руководить очень молодой тогда В.С. Стрелков. Семинар проходил в кабинете Стрелкова. Я увидел, как туда быстро вошел невысокого роста спортивно сложенный, элегантный человек и сел в приготовленное для него потертое дубовое кресло. Кстати, это кресло, вывезенное после

войны из Института Кайзера Вильгельма в Берлине по преданию принадлежало Гейзенбергу. Мне бросилось в глаза, как остро и живо Арцимович реагировал на все, о чем говорили на семинаре. Видно было, что он мгновенно схватывает суть, быстро находит главные болевые точки в материале и тут же ставит острые вопросы докладчику. После семинара присутствующие столпились у доски, продолжая обсуждать только что услышанное. Арцимовича окружала молодежь — В. Стрелков, А. Разумова, В. Мухоматов, Д. Иванов и др. Меня тогда поразила полная непринужденность и демократичность всего происходящего. С Арцимовичем бурно спорили, ему возражали, при этом его чуть ли не дергали за рукав, т.е. вели себя абсолютно по-семейному с полным отсутствием какой-либо учтивости. Для меня же, новичка в этой среде, Арцимович был легендарной личностью, одним из создателей атомной техники, Героем Социалистического Труда, академиком-секретарем и т.д. Со всем этим как-то не вязалось такое фамильярное обращение с ним "токамачной" молодежи. К большому для меня счастью, я вскоре тоже стал членом этой замечательной семьи, и мне тоже стало доступно участие в таких живых и временами весьма темпераментных спорах с ним.

Вскоре я получил возможность непосредственно общаться с Арцимовичем. Дело в том, что он начал проявлять живой интерес к нашим экспериментам по измерению потоков атомов из плазмы токамаков. Отношение Арцимовича к экспериментальному материалу заслуживает особого внимания. Надо сказать, что я считал его тогда скорее теоретиком, чем экспериментатором. Он прекрасно знал все существовавшие теоретические модели, относящиеся к физике плазмы, умел их комбинировать и прилагать к конкретным условиям. Но он также умел замечательно глубоко анализировать данные эксперимента, понимал их физическую основу, быстро оценивал степень их надежности и диапазон применимости. Эта редкая способность позволяла ему тут же, в процессе обсуждения, сопоставлять результаты эксперимента и предсказания теории.

Еще одна, свойственная Арцимовичу черта, проявлявшаяся в непосредственном общении с ним, произвела на меня сильное впечатление. Это была его феноменальная способность к быстрым численным оценкам результатов теории. На моих глазах он брал некое совершенно неподъемное уравнение или формулу, что-то упрощал, чем-то пренебрегал, раскладывал в ряд, отбрасывал малые члены ряда и, как фокусник, достаяющий из рукава голубя или кролика, получал численный результат. Впоследствии вы могли решать это уравнение численно на компьютере и получали тот же результат с точностью до 10–15 %.

Он любил непосредственно повозиться с сырыми экспериментальными данными. Вспоминается случай из середины шестидесятых годов, который произвел на меня сильнейшее впечатление. Я тогда много времени проводил в Москве из-за работы на токамаках и останавливался у своих друзей. Как-то в субботу или в воскресенье мы гуляли с ними весь день по Москве, а вечером собрались дома большой компанией. Вдруг в разгар веселья меня позвали к телефону. Я был очень удивлен, казалось, что звонить мне сюда было некому. Еще более я удивился, когда в трубке услышал голос Льва Андреевича. "Миша, — сказал он, — извините, что я вас беспокою в выходные дни. Но я вот тут перестраиваю ваши данные... Скажите, вы делите показания на корень из энергии, чтобы была размерность плотности или нет?"

Остолбенев от того, что мне, менеэсу, звонит домой сам академик-секретарь, я пробормотал: "Да, я делю...". "Ну, хорошо, — сказал он, — в понедельник сравним наши графики..." Я долго не мог прийти в себя после звонка. Я был ошеломлен громадным динамическим диапазоном этого человека, с одной стороны занимавшегося проблемами организации науки и стимулирования ее новых отраслей, а с другой строившего карандашом на миллиметровке мои экспериментальные точки. Кроме того, мне было стыдно, что вот я гуляю и веселюсь в выходные дни, а он, сидя на даче, строит за меня графики и пишет формулы.

Применение ленинградских атомных анализаторов на токамаках оказалось весьма плодотворным. Удалось наладить надежные измерения ионной температуры плазмы на работавших тогда в Москве токамаках и, в частности, доказать на этой основе термоядерную природу нейтронов, впервые в практике термоядерных исследований зарегистрированных на Токамаке-3 в 1969 году [4]. Пожалуй, важнейшим результатом нашей деятельности под руководством Льва Андреевича было появление на свет в 1970 году знаменитой формулы Арцимовича для ионной температуры в плазме токамаков [5]. Арцимович заметил, что поток энергии от электронов к ионам в предположении о классическом омическом характере нагрева ионов не зависит от электронной температуры. Что касается потерь энергии ионами, то он предположил, что они определяются в основном классической теплопроводностью. Выражение для теплопроводности Арцимович взял из только что появившейся тогда теории классической теплопроводности на запертых частицах Галева–Сагдеева. В результате Лев Андреевич получил выражение, описывающее зависимость ионной температуры от комбинации параметров плазмы

$$T_i \sim (IH_z n_e R^2)^{1/3} A^{-1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $I$  — ток плазмы,  $H_z$  — продольное магнитное поле,  $n_e$  — концентрация электронов в плазме,  $R$  — большой радиус плазмы,  $A$  — изотопное число (водород или дейтерий).

Для меня было большой честью то, что я стал соавтором Арцимовича в этой работе. Скажу откровенно, что моя роль была чисто технической. Лев Андреевич просил подобрать для него величины ионной температуры, измеренные нами с помощью атомных анализаторов и соответствующие параметру плазмы. Измеренные величины ионной температуры в омических режимах токамаков оказались хорошо соответствующими формуле (1). Это давало возможность сделать очень важный вывод о том, что энергобаланс ионов в плазме токамаков имеет классический характер. Понятно, что такой вывод весьма усилил позиции руководимых Арцимовичем московских токамаков в мире.

Формула (1) была выведена для стационарного состояния плазмы. Затем Арцимович предложил мне проанализировать динамику энергобаланса ионов на основе динамики ионной температуры и плотности. Задача состояла в том, чтобы на основе такого анализа получить величину энергетического времени жизни ионов и ее ход во времени разряда. "Если у вас получится, профессор, — сказал Лев Андреевич со свойственной ему иронией, — напишите заметку для "Писем в ЖЭТФ". Он мог бы гораздо быстрее провести такой анализ и написать заметку сам. Но по сути своей натуры

он был не только выдающимся ученым, но и замечательным учителем. Он подвел меня за руку к такому анализу и явно из педагогических целей, а также из желания выдвинуть своего молодого ученика, дал проделать это мне самому. Я уехал в Ленинград и вскоре привез ему оттуда текст заметки. Осознавая меру ответственности, я старался сделать эту работу как можно лучше, и мне казалось, что я написал заметку хорошо. Арцимович не нашел в ней ошибок, но испещрил весь текст стилистическими правками. Отдавая правленный текст, он произнес запомнившиеся мне слова: "Миша, надо писать мужественно и элегантно..." Заметка с его правкой была затем нами опубликована [6].

Надо заметить в связи с этим, что сам он обладал замечательным литературным стилем. Достаточно прочесть его книгу "Управляемые термоядерные реакции", чтобы убедиться в этом. Вот, например, он так пишет о плазменном сгустке (с. 195): "*...этот сгусток отнюдь не радует глаз очертаниями своих границ. ...он скорее напоминает чернильную кляксу, чем ровный кружок*". И подобных примеров метафорического и несколько ироничного описания явлений в книге немало.

Однако о литературном стиле Арцимовича следовало бы поговорить отдельно, вне рамок этого краткого сообщения. Во всяком случае ясно, что только автор, абсолютно владеющий материалом, может доставить удовольствие себе и читателям, излагая научную информацию изящным литературным стилем. Именно таким автором своих научных и популярных трудов был Арцимович.

Формула (1) была выведена Арцимовичем для так называемого "столкновительного" режима, в котором работали все существовавшие тогда токамаки. В своем знаменитом обзоре "Установки токамак" [7] Лев Андреевич показал, что с ростом ионной температуры плазма токамаков перейдет в "бесстолкновительный" режим, где зависимость температуры от тока плазмы и изотопного числа будет более сильной и примет вид  $T_i \sim I^2 A^{-3/2}$  вместо  $T_i \sim I^{1/3} A^{-1/2}$  для столкновительного режима. Арцимович показал также, что в новом Токамаке-4, введенном в строй в начале 1970 г. (последний прижизненный токамак Арцимовича), возможен переход в бесстолкновительный режим. Это означало, что при переходе к максимальному току в Т-4 и при работе с водородной плазмой можно ожидать гораздо более быстрого роста температуры ионов, чем это предсказывалось формулой (1). Если бы удалось тогда получить этот эффект, это было бы очередным грандиозным успехом токамаков, еще одним неоспоримым свидетельством классического характера теплопроводности ионов. Такая задача была поставлена нам Арцимовичем в 1972 году. Эксперименты на Т-4 по подъему тока и параллельным измерениям ионной температуры стали настоящей страстью Льва Андреевича, причем последней его научной страстью, ибо проходили они всего за два-три месяца до его смерти. Это время зимой 1972–1973 гг. навсегда врезалось в мою память. Тогда впервые мы применили для измерений ионной температуры новую модель атомного анализатора — пятиканальный анализатор, способный измерять ионную температуру и ее зависимость от времени в каждом разряде токамака. Это сильно сэкономило время экспериментов, но работа по подъему тока шла тяжело. Различного рода неисправности появлялись одна за другой. Лев Андреевич уже плохо себя чувствовал, но звонил нам из дома в пультую по несколько раз в сутки. Как это часто бывает на

больших экспериментальных установках, работа после многочисленных наладок и настроек разворачивалась обычно к вечеру и продолжалась до глубокой ночи. Но, увы, результат напряженной работы на Токамаке-4 в течение нескольких недель не дал ожидаемых результатов.

Несмотря на то, что удалось повысить ток плазмы почти вдвое по сравнению с прежними экспериментами, ионная температура не вышла за рамки, определенные формулой (1). Это свидетельствовало о том, что плазма не перешла в бесстолкновительный режим. Лев Андреевич не скрывал разочарования. Его последняя научная страсть окончилась отрицательным результатом. Разочарование было, правда, смягчено тем, что Лев Андреевич понял его причину. В одном из последних телефонных разговоров с пультуной Т-4, когда ему сообщили, что даже при максимальных токах температура плазмы не поднимается должным образом, он высказал предположение, что, по-видимому, в напряженных режимах много примесей поступает в плазму, и примеси не дают плазме выйти в бесстолкновительный режим. Это было последнее, что я от него услышал. Буквально через несколько дней он умер, оставаясь до самой смерти подвижником науки.

Характерно то, что он оказался прав в своем последнем в жизни научном выводе. Позднейший подробный анализ, проведенный нами, показал, что есть много данных, свидетельствовавших об интенсивном поступлении примесей в плазму Т-4 при больших токах разряда. Эти результаты были опубликованы нами через четыре месяца после смерти Арцимовича [8]. Проблема примесей вышла после этого на токамаках на первый план. В следующих поколениях токамаков, уже без Арцимовича, она успешно решалась посредством применения диверторов (устройств для удаления примесей с поверхности плазмы) и использования специальных технологий для обработки стенок плазменной камеры.

В этом году мы отметили 90 лет со дня рождения Льва Андреевича. Уже двадцать шесть лет его нет с нами. Но установки типа токамак, которым он посвятил значительную часть своей жизни, работают теперь в ведущих лабораториях мира, демонстрируя практическую осуществимость управляемой термоядерной реакции с большим выходом полезной энергии.

## Список литературы

1. Сахаров А. Д., в сб. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* (Под ред. М. А. Леонтовича) (М.: Изд. АН СССР, 1958) с. 20
2. Афросимов В. В. и др. *ЖТФ* **30** 1456 (1960)
3. Афросимов В. В. и др. *Nuclear Fusion Suppl.* (3) 921 (1962)
4. Арцимович Л. А. и др. *Письма в ЖЭТФ* **10** 130 (1969)
5. Арцимович Л. А., Глухов А. В., Петров М. П. *Письма в ЖЭТФ* **11** 449 (1970)
6. Арцимович Л. А., Горбунов Е. П., Петров М. П. *Письма в ЖЭТФ* **12** 89 (1970)
7. Арцимович Л. А. *Nuclear Fusion* **12** 215 (1972)
8. Gorbunov E. P., Zaverjaev V. S., Petrov M. P., 6-th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics Vol. 1 (Moscow: 1973) p. 1