

В эти дни работавшие с Б.Б. Кадомцевым люди делятся воспоминаниями об этом мудром и добром человеке. Редколлегия журнала с удовольствием публикует одно из таких воспоминаний.

УДК 533.9

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ БОРИСА БОРИСОВИЧА КАДОМЦЕВА (Воспоминания)

А.В. Недоспасов

Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

9 ноября 2018 г. исполнилось 90 лет со дня рождения академика Бориса Борисовича Кадомцева. Среди тех, кому посчастливилось работать и просто общаться с ним, он остался в памяти не только как гений в применении наиболее передовых теоретических методов к самым важным практическим проблемам реальной термоядерной плазмы, но и как отзывчивый руководитель, оказавший вдохновляющее влияние на целое поколение теоретиков-плазменщиков.

Ключевые слова: Б.Б. Кадомцев, 90-летие, теория физики плазмы, термоядерные реакторы.

TO THE 90TH ANNIVERSARY OF BORIS BORISOVICH KADOMTSEV BIRTHDAY (Memories)

A.V. Nedospasov

Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

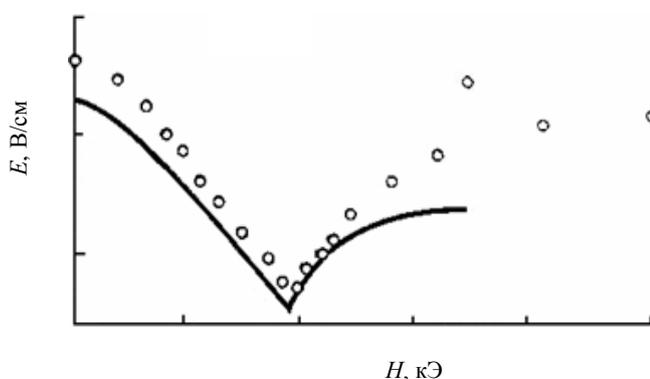
On 9 November 2018 we celebrated the 90th anniversary of the full member of the USSR Academy of Sciences Boris Borisovich Kadomtsev birthday. Those, who was lucky to work or simply come into contact with him remember him as a genius in application of the most advanced theoretical methods to the most important problems of real thermonuclear plasma and as a responsive leader that exerted inspiring influence on the whole generation of theoreticians working in the area of plasma physics. These days the people who worked with him share their memories on this wise and nice man to colleagues. The journal editorial board is publishing below one of such memories with delight.

Key words: B.B. Kadomtsev, 90th anniversary, plasma physics theory, fusion reactors.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-106-109

В студенческом общежитии МГУ на Стрмынке по вечерам выстраивалась очередь к титану за кипятком. В этой очереди я и познакомился со скромным и немногословным юношей, учившемся на младшем курсе физфака, Борисом Кадомцевым. Лет через десять я снова увидел Кадомцева на семинаре отдела плазменных исследований в Курчатовском институте.

Осенью 1959 г. Р.З. Сагдеев вернулся с Международной конференции по ионизационным явлениям в газах и рассказал об обнаружении Б. Леннертом неустойчивости разряда в продольном магнитном поле в трубке с непроводящими стенками. Мы с Борисом Борисовичем молча возвращались с семинара и думали об услышанном. В то время я провёл эксперимент по измерению анизотропии диффузии плазмы в магнитном поле в стеклянной трубке и через несколько дней высказал Борису Борисовичу предположение, что в опытах Леннерта разряд завивается в спираль под действием электродинамических сил,



Напряжённость продольного электрического поля в положительном столбе разряда в зависимости от напряжённости наложенного продольного магнитного поля (в гелии при давлении 0,89 торр и радиусе разрядной трубки 1 см)

преодолевающих стабилизацию радиальной диффузии к стенкам. Борис Борисович сразу написал основные уравнения для электронов и ионов в слабоионизованном газе в однородном магнитном поле. Затем мы вывели уравнение для малых винтовых возмущений параметров плазмы, усреднив радиальные профили, описываемые функциями Бесселя нулевого и первого порядков. Из выведенных законов подобия для осесимметричного положительного столба в продольном магнитном поле, используя известные данные о параметрах разрядов без магнитного поля, мы рассчитали изменение продольного электрического поля в опытах Леннерта (см. рисунок).

Количественное согласие расчётной и экспериментальной зависимостей оказалось очень хорошим, включая критическое значение напряжённости магнитного поля, при котором возникала неустойчивость. Не ограничиваясь этим результатом, Борис Борисович вывел нелинейные уравнения для токовой конвекции плазмы после потери устойчивости. Расчёты по ним совпали с экспериментальными данными в начале развития неустойчивости, но разошлись в более сильных магнитных полях, где параметры разряда определялись уровнем турбулентности.

Доложив эту работу на семинаре теоретического сектора М.А. Леонтовича, мы подготовили статью для «Журнала технической физики». В то время Борис Борисович купил портативную пишущую машинку и двумя пальцами напечатал текст в четырёх экземплярах под копирку, а я своим корявым почерком вписал многочисленные формулы. Судьба этой рукописи оказалась счастливой.

В то время обсуждалась возможность осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС) в горячей плазме, удерживаемой магнитным полем. В 1956 г. мировой научной сенсацией стал доклад И.В. Курчатова в Харуэле (Англия) «О возможности получения управляемых термоядерных реакций в газовых разрядах». В докладе были представлены экспериментальные данные, показывающие, что удержание плазмы магнитным полем тока неустойчиво. После доклада И.В. Курчатова в печати начали появляться работы по удержанию плазмы в магнитных полях. Известная в то время гипотеза Д. Бома о существовании универсальной мелкомасштабной турбулентности замагниченной плазмы ставила под сомнение саму возможность реализации управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием. В нашей работе открытая Леннертом турбулентность была объяснена макроскопической токовой конвекцией плазмы. Л.Л. Арцимович и М.А. Леонтович предложили И.В. Курчатову опубликовать эту статью в Англии [1].

В Англии рукопись получили после скоропостижной смерти И.В. Курчатова. Возник вопрос, как рукопись попала на Запад, минуя необходимое разрешение Госкомитета по атомной энергии, но осталась подписанная И.В. Курчатовым копия сопроводительного письма. Ещё до выхода в свет журнала с нашей статьёй мы с Б.Б. Кадомцевым стали получать из США экспериментальные данные о неустойчивости разрядов в продольном магнитном поле.

Борис Борисович создал и развил теорию турбулентности положительного столба разряда в сильном магнитном поле в трубке с непроводящими стенками. Используя аналогию описания турбулентной затопленной струи Прандтля, он объяснил уровень потерь в турбулентном столбе разряда, оценил поперечный масштаб турбулентных пульсаций, рассчитал радиальный профиль плазмы [2]. Этот профиль был подтверждён экспериментом в нашей работе с Л.Л. Арцимович — дипломницей физфака МГУ [3].

Структура турбулентности в положительном столбе с замагниченными ионами была детально исследована в кандидатской диссертации С.С. Соболева. Без использования вычислительных машин изящными электрофизическими способами он выполнил кросс-корреляционный анализ сигналов с ленгмюровских зондов и подтвердил, что поперечные размеры пульсаций были намного меньше продольных. Однако предсказанные Б.Б. Кадомцевым размеры поперечных пульсаций не наблюдались, а имела место заметная корреляция колебаний в поперечном сечении. Борис Борисович неоднократно приходил в лабораторию и, «хмыкая», рассматривал результаты измерений. Много позже я понял, что в экспериментах С.С. Соболева присутствовали низкочастотные ионизационные колебания прианодного скачка потенциала, слегка модулирующие силу тока, что было зафиксировано чувствительной аппаратурой. Предсказанные Б.Б. Кадомцевым масштабы поперечных пульсаций подтвердили эксперименты Паулюкуса и Пайла (США) [4].

В 1964 г. Б.Б. Кадомцев опубликовал фундаментальную работу «Турбулентность плазмы» [5]. В ней, в частности, коэффициент турбулентной диффузии плазмы был оценен как отношение линейного инкремента неустойчивости к квадрату её волнового числа:

$$q \approx - \left\langle \frac{\gamma}{k_{\perp}^2} \right\rangle \frac{dn}{dx}.$$

Гармонические колебания плазмы с установившимися амплитудами сами по себе не приводят к появлению усреднённого по времени потока частиц. Если же амплитуда колебаний возрастает со временем, то каждый последующий полупериод приводит к несколько большему смещению плазмы, чем предыдущий. При наличии градиента плотности появляется средний перпендикулярный магнитному полю поток плазмы. При этом увеличивается среднее смещение колеблющейся плазмы, зависящее от

инкремента неустойчивости. Амплитуда нелинейной волны перестаёт расти, когда градиент плотности в волне становится равным основному градиенту плотности, существующему в плазме.

Теоретический сектор М.А. Леонтовича был коллективом талантливых и амбициозных молодых учёных. Публикации экспериментаторов создавали условия для конкуренции в физической интерпретации новых явлений. В этом Б.Б. Кадомцев безусловно опережал своих коллег, что задевало их честолюбие, а у некоторых вызывало зависть. На одном из семинаров Р.З. Сагдеев повеселил слушателей, с артистизмом манипулируя инкрементами известных неустойчивостей и произвольными масштабами волновых чисел, и показал, что по оценке Б.Б. Кадомцева можно получить много разных результатов. Справедливость формулы Кадомцева для сильной пристеночной турбулентности плазмы в токамаках, в которой инкремент пропорционален квадрату волнового числа, была убедительно подтверждена экспериментами [6, 7]. Борис Борисович как-то заметил, что в токамаках «пристеночный слой плазмы с сильной турбулентностью также необходим для центрального горячего ядра как животному его шкура».

Когда для отдела Л.А. Арцимовича построили новый корпус, В.Д. Шафранов и Б.Б. Кадомцев получили небольшую рабочую комнату, в которую я нередко заходил. В конце рабочего дня полагалось расписываться в журнале противопожарной безопасности. В.Д. Шафранов, расписываясь, часто делал примечания в стихотворной форме. Например: «Послали на Луну ракету, пожара не было и нету»; «Сегодня, уж в который раз, пожара не было у нас»; «Забор поставили на крыше, в век космоса могли б и выше». Помню, как в дверях этой комнаты появился Л.А. Арцимович и сказал: «Борис Борисович, вам нужно поскорее защитить докторскую диссертацию».

Замечу, что сотрудники М.А. Леонтовича странно относились к защите докторской диссертации, хотя она заметно увеличивала зарплату. С.И. Брагинский не стал защищать докторскую диссертацию по своим термоядерным исследованиям, за которые получил Ленинскую премию, Б.А. Трубников легкомысленно защитил только кандидатскую диссертацию по выдающейся работе о циклотронных потерях энергии из горячей плазмы, В.Д. Шафранову, минуя кандидатскую, сразу присудили степень доктора наук. Надо отдать должное, Курчатовский институт обеспечивал своих ведущих сотрудников комфортным жильём, в то время главной материальной ценностью.

Выполнить указание Л.А. Арцимовича для Бориса Борисовича не составило труда, и сразу после защиты он был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению физики. Обычно защитивший докторскую диссертацию устраивал для друзей банкет в хорошем ресторане. После избрания Б.Б. Кадомцева в Академию В.Д. Шафранов написал в «противопожарном» журнале: «Член-корр. — подумайшь мне диво, вот будет ли опять коньяк иль пиво?»

После смерти Л.А. Арцимовича Б.Б. Кадомцев возглавил отдел плазменных исследований, преобразованный впоследствии в Отделение физики плазмы, а затем и в институт в составе ИАЭ им. И.В. Курчатова. В 1975 г. вступил в строй токамак Т-10 — последний из советских токамаков среднего масштаба. Джоулев нагрев, первоначально использовавшийся в токамаках, при повышенных температурах плазмы перестал быть эффективным. В ряде стран были построены токамаки с новыми средствами нагрева ионов плазмы и диверторной конфигурацией магнитного поля (опробованной ещё на малых «перстеньковых» токамаках в ИАЭ).

В марте 1983 г. на Бюро Отделения физико-технических проблем энергетики АН Борис Борисович рассказал о состоянии физических исследований УТС, я — о технических проблемах и оценках экономической эффективности, выявленных в концептуальных проектах промышленных термоядерных электростанций. Из наших докладов следовало, что в первой четверти XXI века применения УТС в большой энергетике не будет.

Б.Б. Кадомцев внёс весомый, а часто решающий, вклад во все разделы физики токамаков, и эта тематика стала узкой для его таланта. Его творческий ум не мог оставаться пассивным, и он занялся переосмыслением основных положений квантовой теории. Первой была работа об атоме водорода в сверхсильном магнитном поле. Затем последовал анализ фундаментальных проблем, таких как парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена, объяснение эффекта Ю.Л. Соколова, квантовая коммуникация, включающая распространение информации со скоростью больше скорости света. О новых результатах Борис Борисович прежде всего рассказывал на семинаре отдела и на Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС. Некоторые кадровые сотрудники Отдела плазменных исследований сетовали, что вместо обсуждения научных и хозяйствен-

ных задач они слушали, что возможна передача информации с бесконечно большой скоростью. В 1994 г. в УФН был опубликован обзор Б.Б. Кадомцева «Динамика и информация» [8]. Позднее вышла его книга «Динамика и информация», не переведённая, к сожалению, на английский язык.

В течение многих лет Б.Б. Кадомцев был членом Редколлегии, а затем и главным редактором журнала «Успехи физических наук» (УФН). Наряду с фундаментальными обзорными статьями популярность журнала УФН поддерживали рубрики «Физика наших дней» и «Методические заметки». В разделе «Физика наших дней» Б.Б. Кадомцев в соавторстве с сыном опубликовал обзор «Конденсаты Бозе—Эйнштейна». Я поделился с ним предположением, что может существовать неидеальный вырожденный бозе-газ очень легких частиц с электрическим дипольным моментом и что это может иметь отношение к некоторым непонятным явлениям.

Последний раз мы встретились с ним в коридоре возле конференц-зала Звенигородского пансионата в 1997 г. Он только что вернулся из Канады, где познакомился с двухтомной энциклопедией по парапсихологии, и хотел рассказать о новых идеях, которые у него появились. Я куда-то торопился, и разговор не состоялся, а вскоре я надолго уехал из Москвы. Чтобы прийти к этим невысказанным Борисом Борисовичем идеям, может быть, понадобится работа целого поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kadomtsev B.B., Nedospasov A.V.** Of the positive column in a magnetic field and the «anomalous diffusion effect». — J. Nucl. Energy, 1960, vol. C 1, p. 230.
2. **Кадомцев Б.Б.** Конвекция плазмы положительного столба в магнитном поле. — ЖТФ, 1961, vol. 31, p. 1273.
3. **Арцимович Л.Л., Недоспасов А.В.** Радиальное распределение плазмы положительного столба в магнитном поле. — ДАН СССР, 1962, т. 145, с. 1002.
4. **Paulikas G.A., Pyle R.V.** Macroscopic instability of the positive column in a magnetic field. — Phys. Fluids, 1962, vol. 5, p. 348.
5. **Кадомцев Б.Б.** Турбулентность плазмы. — В сб.: Вопросы теории плазмы. Под ред. М.А. Леонтовича. — М.: Атомиздат, 1964, т. 4, с. 188.
6. **Endler M., Giannone L., McCormick K. et al.** Turbulence in the SOL of ASDEX and W7-AS. — Phys. Scr., 1995, vol. 51, p. 610.
7. **Endler M., Niedermeyer H., Giannone L. et al.** Measurements and modelling of electrostatic fluctuations in the scrape-off layer of ASDEX. — Nucl. Fusion, 1995, vol. 35, p. 1307.
8. **Кадомцев Б.Б.** Динамика и информация. — УФН, 1994, т. 164, с. 449.



Артур Владимирович Недоспасов, с.н.с., д.ф.-м.н., профессор; Объединённый институт высоких температур РАН, 125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, Россия
a-nedospasov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2018 г.
После доработки 16 сентября 2018 г.
Принята к публикации 27 сентября 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 4, с. 106—109.