

УЧЕНЫЙ,

УЧИТЕЛЬ,

ДРУГ...

*Книга об
Андрее
Акимовиче
Иванове*

Москва 2014

УДК 533.9
ББК 22.9
У 91

Ученый, учитель, друг... Книга об Андрее Акимовиче Иванове.
– М.: «Тривант», 2014. – 134 с. : ил.

Научный редактор: д. физ.-мат. н., член корр. РАН
А.Б. Михайловский.

Редакционная группа: Л.И. Елизаров, А.Н. Пастухов,
Г.В. Поволоцкая.

Книга посвящена известному ученому, физику-теоретику в области физики и химии плазмы, доктору физико - математических наук, профессору Андрею Акимовичу Иванову. Книга состоит из двух частей: в первой приведена краткая научная биография и ряд трудов, отражающий основные направления научной деятельности А.А. Иванова, во второй - воспоминания его сотрудников, учеников и родственников - тех, кто хорошо его знал и работал вместе с ним. Для читателей, интересующихся физикой и химией плазмы.

ISBN 978-5-89513-343-9

Андрей Акимович Иванов.

(1939 – 2007)

Андрей Акимович Иванов родился 24 мая 1939 г. в городе Грозном.

В 1962 году Андрей окончил университет по специальности «физика» и успешно сдал спецэкзамен по теоретической физике - «минимум Ландау».

В 1962 - 1964 гг. работал в Арзамас-16 (г. Саров) в теоретическом отделе под непосредственным руководством Я.Б. Зельдовича.

В 1964 г. поступил в аспирантуру Института атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова.

В 1966 г. начал работать в ИАЭ в подразделении академика Е.К. Завойского, став сотрудником теоретической лаборатории под руководством Д.А. Франк-Каменецкого.

В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Динамика квазилинейной релаксации», научным руководителем диссертации у него был д. физ.-мат. н. Л.И. Рудаков.

В 1971 г. защитил докторскую диссертацию «Взаимодействие высокочастотных полей с плазмой», и ему была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. Эти работы были посвящены нелинейным процессам взаимодействия электромагнитных волн с плазменными колебаниями, а также изучению электромагнитных волн с двойной плазменной частотой. Впервые была решена задача по динамике квазилинейной релаксации электронных пучков в плазме, это решение затем было подтверждено экспериментально. Работа стала основой для понимания общих процессов, происходящих при релаксации электронных пучков малой плотности в плазме.

В 1967 – 1968 годах А.А. Иванов выполнил цикл работ по стабилизации наиболее опасных неустойчивостей в плазме в высокочастотном магнитном поле. Проведенные позднее советскими и английскими физиками эксперименты подтвердили его теоретические предсказания.

В 1968 г. А.А. Ивановым совместно с Л.И. Рудаковым, Е.К. Завойским и М.В. Бабыкиным была предложена концепция использования мощного пучка релятивистских электронов для термоядерного синтеза.

В 1968 г. А.А. Иванов был приглашен на работу в Прагу в Институт физики плазмы, где вел совместные теоретические работы с физиками Чехословакии, был опубликован ряд статей о влиянии высокочастотных магнитных полей на неустойчивости плазмы.

В 1970 г. А.А. Ивановым совместно с Р.З. Сагдеевым было найдено нелинейное решение, описывающее распространение тепловых волн в плазме, которое позднее было подтверждено экспериментально.

Совместно с В.Д. Русановым им разрабатывались подходы к нагреву плазмы в установках типа Токамак при помощи магнитозвуковых волн. А.А. Иванов уделял большое внимание и вопросам теории электронно-циклотронного нагрева в ловушках, а также неустойчивостям в плазме твердого тела. Большая часть этих работ была представлена в обзоре «Взаимодействие высокочастотных полей в плазме», опубликованном в 1972 году в выпуске «Вопросы теории плазмы», а также в книге А.А. Иванова «Физика сильнонеравновесной плазмы», вышедшей в 1977 году. Эти работы представляют собой значительный вклад в теорию физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

В 1972 г. А.А. Иванов по приглашению Индийского правительства работал в Индии, выступая в университетах и ядерных центрах с лекциями по ядерной физике.

В 1972 г. по приглашению Л.А. Арцимовича А.А. Иванов перешел в Отдел плазменных исследований (ОПИ) начальником лаборатории плазмохимии и начал заниматься проблемами физики низкотемпературных разрядов с целью использования их для плазмохимии.

В 1974 году А.А. Иванов был утвержден в ученом звании старшего научного сотрудника по специальности «Физика и химия плазмы».

В 1978 году ему присвоено ученое звание профессора по специальности «Физика и химия плазмы».

А.А. Ивановым была создана концепция нового низкотемпературного разряда: плазменно-пучкового разряда, в котором для нагрева электронов использовалась плазменно-пучковая неустойчивость, открытая в 1948 году Я.Б. Файнбергом. Физические основы этого разряда изложены в книге А.А. Иванова

«Неравновесная плазмохимия», вышедшей в 1978 году. Многочисленные теоретические и экспериментальные работы привели к созданию целого ряда установок по травлению полупроводниковых материалов, напылению аморфного кремния, по синтезу окиси азота из воздуха, а также восстановлению металлов из хлоридов и окислов

В это же время А.А. Иванов уделял большое внимание вопросам создания плазменной центрифуги, в которой стационарная плазма поддерживалась плазменно-пучковым разрядом. Под его руководством были созданы оригинальные установки: «Пласт», «В-1», «В-2», «Лента», «Спрут», и ряд установок серии «Оратория», которые являются уникальными разработками и имеют практическое применение в плазмохимии.

Эти работы подробно изложены в его обзоре в книге «Итоги науки и техники» (1982 год). По этой тематике было получено более 50 авторских свидетельств по плазмохимическому реактору с электронным пучком и плазменной центрифуге с электронным пучком для разделения изотопов, а также медали на ВДНХ.

С 1974 года начались совместные работы с лабораторией института Электронной физики и кафедрой физики университета Грайсвальда в ГДР и с Институтом физики в Берлине. В течение десяти лет под руководством А.А. Иванова проводились совместные теоретические и экспериментальные работы в области пучково-плазменного разряда, вышло большое количество публикаций в журналах «Contributions to Plasma Physics» и «Физике плазмы».

В 1985 по 1990 гг. А.А. Иванов работал в должности заместителя Генерального конструктора КБ «Салют» по научной работе, занимаясь вопросами космической плазмы. В КБ «Салют» под руководством А.А. Иванова был сформирован крупный научный коллектив, которым в качестве противовеса американской СОИ (стратегической оборонной инициативе) была выполнена программа научно - исследовательских, экспериментальных и конструкторских работ по созданию самых современных систем вооружения на базе новых физических принципов.

В 1990 г. А.А. Иванов вернулся в Курчатовский институт и работал главным научным сотрудником, заместителем директора Института прикладной химической физики РНЦ «Курчатовский

институт», а затем заместителем директора по науке института ИВТЭМ РНЦ «Курчатовский институт».

В последнее время А.А. Иванов продолжал заниматься вопросами физики низкотемпературной плазмы, и был опубликован ряд теоретических и экспериментальных работ, а также на XXII ICPIG - конференции в Нью-Йорке в 1995 году был сделан обзорный доклад по физике разрядов с целью их использования для плазмохимии.

В 2003 году вышла книга «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», в которой была статья А.А. Иванова о плазменно-пучковом разряде.

В 90-х годах начались многочисленные совместные работы А.А. Иванова с физиками Франции, Голландии, Германии, Румынии и Украины по грантам Комиссии Европейского Сообщества “Copernicus” и “INTAS”. Совместно с французскими учеными им была предложена модель расчета температуры отрицательных ионов водорода методом лазерного фотоотрыва, которая хорошо описывала проведенные эксперименты. Совместно с Эколь Политекник (Палезо, Франция) А.А. Иванов занимался теоретическими и экспериментальными работами, связанными с функционированием стационарных плазменных двигателей (СПД) и исследованием поперечного к магнитному полю тока в подобных системах. Полученный дополнительный корректирующий коэффициент позволил получить гораздо лучшее количественное согласие теоретических и экспериментальных данных

Совместно с учеными Франции и Германии А.А. Иванов много занимался исследованиями в области ионных источников, построенных на принципе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Была разработана новая теория удержания ионов в ЭЦР-ионных источниках, основанная на влиянии параметрических неустойчивостей плазмы на нагрев ионов.

В 2005 году А.А. Ивановым совместно с К. Виземанном (Германия) в журнале IEEE была напечатана большая монография по ионным источникам.

В последние годы под непосредственным руководством Е.П. Велихова А.А. Иванов стал также заниматься работами по магниторотационной неустойчивости (МРН). Этот феномен важен как фундаментальный механизм для переноса углового момента в

замагниченных аккреционных дисках и для генерации геомагнитного поля в жидком ядре Земли. Была предложена схема эксперимента с неподвижными цилиндрами и раскруткой жидкости радиальным током. Анализ уравнений магнитной гидродинамики позволил найти стационарное аналитическое решение с учетом симметричной аксиальной подводки тока. Был проведен аналитический и численный анализ проблемы.

В 2007 году А.А. Иванов занимался и работой по исследованию нелинейных эффектов в двумерном электронном газе в баллистическом полевом транзисторе для создания источников и приемников излучения терагерцового диапазона. Результаты этих работ могут найти широкое применение в современной медицине и визуализации контроля технологических процессов. Работы проводились совместно с сотрудниками Университета Айзу (Япония).

А.А. Иванов много лет занимался педагогической работой. Огромную часть своего времени он посвящал изучению новых направлений в науке, разработке методик образования, подготовке лекций. С 1968 года он начал преподавать в МФТИ на кафедре общей физики сначала в качестве доцента, а с 1978 года в должности профессора. А.А. Иванов читал лекции и руководил работами студентов, дипломников и аспирантов, под его руководством было защищено более 30 кандидатских диссертаций и четыре докторские. Им были опубликованы в издательстве МФТИ книги по курсу лекций: «Физические основы строения вещества», «Введение в квантовую физику» и «Введение в квантовую физику систем из многих частиц» и издан ряд статей в журнале «Физическое образование».

А.А. Иванов уделял много сил и энергии проектам по разработке новой системы образования. Он вел совместные научные работы с МФТИ, с Российским университетом дружбы народов, а также с Бохумским университетом (Германия), Эколь Политехник (Франция), Университетом Айзу (Япония) и другими. Под его руководством велись работы в области создания комплекса программно-аппаратных средств и применения их к инновационным образовательным технологиям, а также разработки интерактивных компьютерных обучающих программ.

Андрей Акимович Иванов был ученым с мировой известностью, который всю свою жизнь посвятил науке. Сферой его интересов

была теоретическая физика, физика и химия плазмы. Большая эрудиция, разносторонность личности, глубокие знания в области физики, живой ум, общительность и профессионализм позволяли ему всегда находиться в центре событий и заниматься наиболее актуальными вопросами. Абсолютное знание шести языков позволяли ему свободно общаться и вести совместные работы с физиками США, Франции, Германии, Голландии, Италии, Чехии, Румынии, Индии, Японии. По приглашению ученых - физиков этих стран он часто работал в зарубежных лабораториях и внес свой вклад в развитие теоретической физики в этих государствах.

За время научной деятельности А.А. Ивановым было опубликовано более пятисот научных статей, десять монографий, пять учебных пособий и две книги.

А.А. Иванов был членом Ученых советов РНЦ «Курчатовский институт», ГНЦ ТРИНИТИ (Пахра), Ереванского Физического Института (Армения) и других Советов. А.А. Иванов был экспертом в журналах *Physical Review* и *Phys. Rev. Letters*, членом редколлегии *Contributions to Plasma Physics* и других изданий.

В 1972 году он награжден медалью «За трудовую доблесть»; в 1985 г. и 2003 г. был лауреатом премии имени И.В. Курчатова.

В 2012 году в издательстве «Физматлит» была издана книга Андрея Акимовича Иванова «Научные труды», в которую вошла часть его наиболее известных научных работ.

**ИЗБРАННЫЕ
НАУЧНЫЕ ТРУДЫ**

Основные научные труды Андрея Акимовича Иванова представляют собой значительный вклад в теорию физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. А.А. Ивановым была создана концепция нового низкотемпературного разряда: плазменно-пучкового разряда (ППР), который успешно был применен в плазмохимии и для высокопроизводительного метода разделения изотопов. Многие годы А.А. Иванов занимался работами по электронно-циклотронному разряду в плазме, а также ионными источниками, плазменными двигателями, астрофизическими аспектами магнитной гидродинамики. Творчество и энергия А.А. Иванова во многом определили развитие нескольких направлений физики и технологии.

В книге представлен ряд трудов, в частности по динамике квазилинейных релаксаций неустойчивых состояний бесстолкновительной плазмы, статьи по физике химически активной плазмы и по влиянию пристеночной рекомбинации на проводимость в СПД (стационарных плазменных двигателях).

ДИНАМИКА КВАЗИЛИНЕЙНОЙ РЕЛАКСАЦИИ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

А.А. Иванов, Л.И. Рудаков
ЖЭТФ, 1966, т. 51(5), с. 1522-1534.

Работа посвящена динамике квазилинейной релаксации неустойчивых состояний бесстолкновительной плазмы. Для случая, когда в начальный момент времени небольшая часть электронов имеет скорость, много большую тепловой скорости основной массы электронов (т. е. имеется слабый пучок), найдено автомодельное решение. Функция распределения в каждый момент времени имеет вид ступеньки с крутым фронтом, движущимся в сторону меньших скоростей. Показано, что такой характер процесса сохраняется для широкого класса начальных функций, и получено уравнение, определяющее скорость движения фронта волны. Наконец, решена задача об определении функции распределения и спектра ленгмюровских колебаний, установившихся при стационарной инжекции пучка в полупространство, занятое плазмой.

1. В первых работах по квазилинейной теории колебаний плазмы [1-2] было показано, что нарастающие во времени одномерные плазменные колебания изменяют исходную неустойчивую функцию распределения так, что рост амплитуды колебаний во времени прекращается. В результате неустойчивая вначале функция распределения становится устойчивой, а в соответствующих областях пространства волновых чисел возникают шумы с уровнем, значительно превышающим тепловой. В условиях, когда столкновения между частицами практически отсутствуют, указанное состояние является стационарным. При этом, пользуясь законами сохранения, следующими из квазилинейных уравнений, можно определить все параметры системы частицы - волны в конечном состоянии. Что касается самого процесса перехода в стационарное состояние, то он не рассматривался. Ниже исследуются закономерности изменения функции распределения во времени в течение процесса квазилинейной релаксации. Для начала рассмотрим систему квазилинейных уравнений для одномерных ленгмюровских колебаний. В качестве исходной функции распределения электронов возьмем функцию, изображенную на рис. 1.

Второй, малый пик функции распределения означает, что через плазму движется со скоростью v_0 пучок электронов малой плотности. Скорость пучка много больше теплового разброса скоростей электронов плазмы c_e . Известно, что такая функция распределения неустойчива. Согласно линейной теории, неустойчивость имеет различный характер в двух предельных случаях [3].

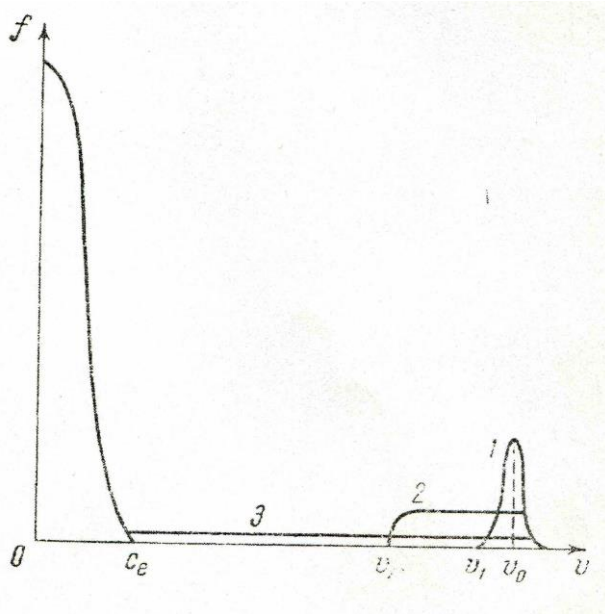


Рис. 1

Когда пучок плотный и почти моноэнергетический, то в плазме нарастают колебания, частота и инкремент которых определяются параметрами всей системы. Если же разброс скоростей в пучке c_{1e} не слишком мал, а плотность пучка n_1 не слишком велика по сравнению с плотностью плазмы n_0 , а именно:

$$c_{1e} / v_0 \geq (n_1 / n_0)^{1/3},$$

то пучок возбуждает ленгмюровские колебания с инкрементом, который определяется поведением функции распределения пучка в окрестности точки $v = v_0$. Во втором предельном случае для описания процесса релаксации неустойчивого состояния к устойчивому применимы уравнения квазилинейной теории

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\omega_0^2}{2n_0 m} \cdot \frac{\partial}{\partial v} \left(\int \varepsilon_k \delta(\omega - kv) dk \cdot \frac{\partial F}{\partial v} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} = \pi \frac{\omega_0^3}{k^2} \varepsilon_k \int k \frac{\partial F}{\partial v} \delta(\omega - kv) dv, \quad \omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi n_0 e^2}{m}}, \quad (2)$$

$$\int F dv = n_1 / n_0, \quad (3)$$

где F - функция распределения электронов пучка по скоростям, нормированная согласно соотношению (3), ε_k - спектральная плотность энергии ленгмюровских колебаний (шумов), ω и k - частота и волновое число [4]. Для рассматриваемой ниже задачи тепловая поправка к частоте ленгмюровских колебаний $\omega = \omega_0$ несущественна. В силу однозначности связи k и v , следующей из соотношения $\omega_0 = kv$, можно в качестве независимой переменной для функции ε_k взять скорость v вместо k . При этом спектральная плотность в k -пространстве будет связана со спектральной плотностью $\varepsilon(v)$ следующим образом: $\varepsilon_k = \varepsilon(v) \omega_0 / v^2$.

Если теперь ввести удобные безразмерные переменные и функции

$$f = \pi \frac{n_0}{n_1} v_0 F, \quad w = \frac{\varepsilon_k \omega_0}{2n_1 m v^3}, \quad \tau = \omega_0 \frac{n_1}{n_0} t, \quad V = \frac{v}{v_0},$$

то уравнения (1), (2) и (3) примут следующий вид:

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial V} \left(w V^2 \frac{\partial f}{\partial V} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = w V^2 \frac{\partial f}{\partial V}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\pi} \int f dV = 1. \quad (6)$$

Из уравнений (4) и (5) следует важное соотношение, простым образом связывающее функцию распределения и шумы:

$$f - f_0 = \frac{\partial}{\partial V} (w - w_0), \quad (7)$$

где f_0 и w_0 - функция распределения и функция w в начальный момент времени. Чтобы получить его, надо подставить $w V^2 \partial f / \partial V$ из уравнения (5) в уравнение (4) и проинтегрировать по τ .

С помощью соотношения (7) можно исключить f из уравнения (5) и получить уравнение, содержащее только $w(V, \tau)$:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = V^2 w \frac{\partial^2 (w - w_0)}{\partial V^2} + V w \frac{\partial f_0}{\partial V}. \quad (8)$$

Уравнение (8) в области, где $\partial f_0 / \partial V = 0$, отдаленно напоминает уравнение, описывающее распространение тепла в пространстве, когда коэффициент теплопроводности есть степенная функция количества тепла.¹⁾

Как известно, в этом случае тепло распространяется в виде волны с крутым фронтом, причем существуют такие области, до которых волна еще не дошла, и температура там равна начальной [5]. При некотором специальном виде граничных и начальных условий для уравнения, описывающего такую волну, удастся получить автомодельные решения [5].

2. Попробуем, как и в теории тепловой волны, найти автомодельное решение нашей задачи. Будем рассматривать те моменты времени, когда функция распределения пучка расширилась в сторону меньших V вплоть до $V = V_m$ таких, что

$$c_{1e} / v_0 \ll 1 - V_m \ll 1. \quad (9)$$

Начальная стадия процесса квазилинейной релаксации, приводящая к сглаживанию функции распределения пучка, конечно, зависит от начального вида f_0 . Однако можно надеяться, что в последующей фазе процесса, когда выполняется левое неравенство (9), детальный вид

¹ В последнее время авторам работы стало известно, что аналогичные соображения высказывались Е.П.Велиховым.

начальной функции распределения электронов пучка не влияет на решение, аналогично тому, как закон распространения тепловой волны при достаточном удалении от области взрыва определяется лишь количеством тепла, выделившимся при взрыве.

При выполнении правого неравенства (9) можно заменить в уравнении (8) V^2 на 1, а $w_0(V)$ на $w_0(1)$. После такого упрощения уравнение (8) явно не зависит от скорости, что существенно облегчает поиски автомодельности. В области $V_m < V < V_1$ (V_1 - точка, где $f_0 f_0$ пренебрежимо мала) уравнения (7) и (8) явно от f_0 не зависят. При этом из уравнения (7) следует, что

$$w(1) - w_0(1) = - \int_{V_1}^{V_m} f dV = \pi = - \int_{V_2}^{V_1} f_0 dV. \quad (10)$$

Последнее равенство приближенное. Оно справедливо с точностью до членов порядка $(1-V_1)/(1-V_m)$, и в основе его лежит предположение, что процесс квазилинейной релаксации приводит к сглаживанию функции распределения.

Чтобы убедиться, что действительно существует автомодельное решение задачи, удовлетворяющее граничному условию (10), введем в уравнениях (7) и (8) новую переменную и функцию

$$\xi = \frac{1-V}{\sqrt{\pi\tau}}, \quad \varphi = \frac{w-w_0(V)}{\pi}. \quad (11)$$

Тогда они примут вид

$$f = -\sqrt{\pi/\tau}\varphi', \quad (12)$$

$$-(1/2)\xi\varphi' = (\varphi + \varphi_0)\varphi'', \quad (13)$$

где штрих означает дифференцирование по ξ , а $\varphi_0 = w_0(1)/\pi$.

Так как f по определению положительна, то, согласно уравнению (12), физический смысл имеют лишь те решения уравнения (13), для которых $\varphi'(\xi) \leq 0$ при всех ξ .

Граничное условие (10) при такой замене записывается в виде $\varphi(0) = 1$, а граничное условие при $\xi = \infty$ имеет вид $\varphi(\infty) = 0$, так как перед фронтом распространяющейся волны шумы равны начальным, а функция распределения равна нулю.

Итак, для нахождения функции распределения в любой момент времени необходимо найти решение уравнения (13) с указанными граничными условиями, у которого $\varphi'(\xi) \leq 0$. Этих требований достаточно для того, чтобы решение было единственным и имело горизонтальную асимптоту $\varphi = 0$ [6]. К сожалению, его не удастся записать в квадратурах, и, вообще говоря, уравнение следует решать численно. На рис. 2 изображены функции φ и $|\varphi|/2$, полученные в результате численного решения уравнения (13) для $\varphi_0 \approx 1/130$.

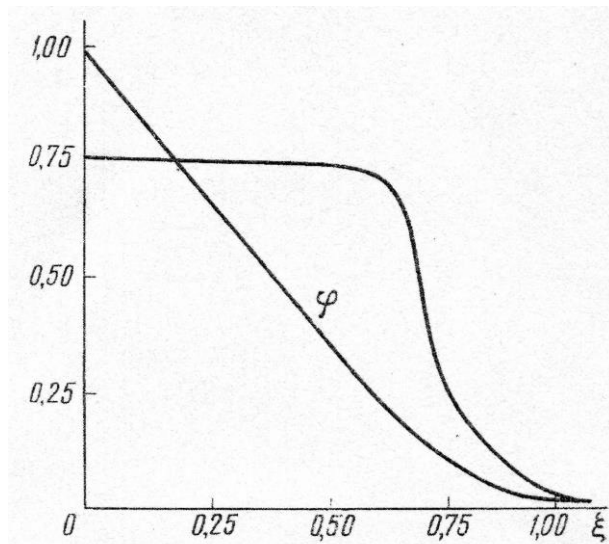


Рис. 2

В том случае, если $\ln(\varphi/\varphi_0) \gg 1$ можно написать приближенное аналитическое решение уравнения (13). Убедимся непосредственной проверкой в том, что решением будет следующая функция:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{2} \xi_0 (\xi_0 - \xi) \cdot \ln \frac{\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{2} (\xi_0 - \xi) - \frac{1}{4} (\xi_0 - \xi)^2. \quad (14)$$

Действительно, дифференцируя $\varphi(\xi)$, получим

$$\varphi'(\xi) = -\frac{1}{2} \xi_0 \cdot \ln \frac{\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{2} \xi_0 (\xi_0 - \xi) \frac{\varphi'}{\varphi} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (\xi_0 - \xi).$$

Далее, деля φ' на функцию φ , определенную равенством (14), находим с точностью до малых величин $\sim [\ln(\varphi/\varphi_0)]^{-1}$, что $\varphi'/\varphi = 1/(\xi - \xi_0)$.

Поэтому

$$\varphi' = -\frac{1}{2} \xi_0 \cdot \ln \frac{\varphi}{\varphi_0} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 + \xi).$$

Аналогичным образом находим φ'' :

$$\varphi'' \approx \frac{1}{2} \frac{\xi}{\xi_0 - \xi}.$$

Члены, содержащие $\ln(\varphi/\varphi_0)$ в выражениях для φ и φ' , по предположению, главные, но мы удержали и малые члены, так как во вторую производную φ они дают вклад. При проверке решения (14) в уравнение (13) можно подставить $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ без малых членов.

Наконец, так как при большом отношении φ/φ_0 логарифм $\ln(\varphi/\varphi_0)$ есть слабо меняющаяся функция, то с «логарифмической точностью»

$$\varphi = \frac{1}{2} \xi_0 (\xi_0 - \xi) \cdot \ln \frac{1}{\varphi_0}. \quad (15)$$

Константа ξ_0 с «логарифмической точностью» определяет «координату» фронта волны. Ее величину можно найти из граничного условия $\varphi(0) = 1$. Она равна

$$\xi_0 \approx \sqrt{2} / \sqrt{\ln(1/\varphi_0)}. \quad (16)$$

Так как формула (15) справедлива при $\ln(\varphi/\varphi_0) \gg 1$, то она не описывает переднюю часть фронта, где $\varphi \approx \varphi_0$. Форму передней части фронта можно приближенно определить, положив в левой части уравнения (13) $\xi = \xi_0$. Решение такого упрощенного уравнения будет справедливо при $\xi - \xi_0 \ll \xi_0$. Интегрируя получившееся уравнение по ξ , получим

$$\varphi' = -\frac{1}{2} \xi_0 \cdot \ln\left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_0}\right). \quad (17)$$

Отсюда

$$\xi - \xi_0 = -\frac{2}{\xi_0} \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\ln(1 + \varphi/\varphi_0)} = \frac{2}{\xi_0} \varphi_0 \left[li\left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_0}\right) - li(2) \right], \quad (18)$$

где li - интегральный логарифм. Здесь мы считаем, что при $\xi = \xi_0$, $\varphi = \varphi_0 \neq 0$. Разлагая $\ln(1 + \varphi/\varphi_0)$ по малости $\varphi/\varphi_0 \ll 1$, получим для передней части фронта следующую формулу:

$$\varphi = \varphi_0 \exp\left\{-\frac{\xi_0}{2\varphi_0}(\xi - \xi_0)\right\}.$$

Из этого выражения видно, что φ приближается к нулю по экспоненциальному закону, причем характерной длиной является очень малая величина $2\varphi_0/\xi_0$.

Найдем еще время, за которое происходит квазилинейная релаксация пучка на интервале Δv . Оно примерно равно времени, за которое фронт волны пройдет в пространстве скоростей расстояние Δv . Из формулы (16) имеем

$$\tau = \pi^{-1} (v_0^{-1} \xi_0^{-1} \Delta v)^2,$$

т.е.

$$t = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\xi_0^2} = \frac{1}{\gamma} \frac{\ln \varphi_0^{-1}}{2}, \quad \gamma = \pi \omega_0 \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{v_0}{\Delta v}\right)^2.$$

Реально для пучков с относительно большой плотностью частиц отношение $1/\varphi_0$, равное отношению энергии конечных и начальных шумов, является очень большой величиной. Так, если вначале шумы были на уровне тепловых, то $1/\varphi_0 \sim N_D n_1/n_0$, где N_D - число частиц в дебаевской сфере. Другими словами, $\ln \varphi_0^{-1}$ почти равен кулоновскому логарифму, Последний же в типичных для эксперимента условиях равен примерно 20.

Полученные результаты можно наглядно объяснить следующим простым образом. За время $1/\gamma$ фронт волны проходит путь в пространстве скоростей примерно равный $\Delta v/\ln \varphi_0^{-1}$. За фронтом волны, где шумы уже почти равны конечным, за то же время $1/\gamma$ происходит образование плато. Если бы уровень шумов перед фронтом был равен нулю, то «волна» стояла бы на месте и фронт ее был бы бесконечно крутым. В действительности,

крутизна фронта конечна, но велика из-за того, что волна движется довольно медленно в масштабе времени $1/\gamma$.

3. Покажем, что описанная нами картина процесса квазилинейной релаксации существенно не меняется и все основные выводы справедливы для более широкого класса начальных функций распределения. Для этого вернемся к исходной системе уравнений (4) - (7). Теперь, однако, начальной функцией распределения будет функция, изображенная на рис. 3, т. е. в плазме, по-прежнему, имеется пучок, движущийся со средней скоростью $V = 1$, но теперь $f_0 = 0$ во всем интервале скоростей.

Можно ожидать, что решение уравнений (4) - (7) должно описывать волну, фронт которой движется в V -пространстве с некоторой скоростью $\dot{u}(\tau)$. Это означает, что величины f и w зависят от V и τ как

$$\begin{aligned} f(V, \tau) &= f(V - u(\tau), \tau) \equiv f(\eta, \tau); \\ w(V, \tau) &= w(V - u(\tau), \tau) \equiv w(\eta, \tau). \end{aligned}$$

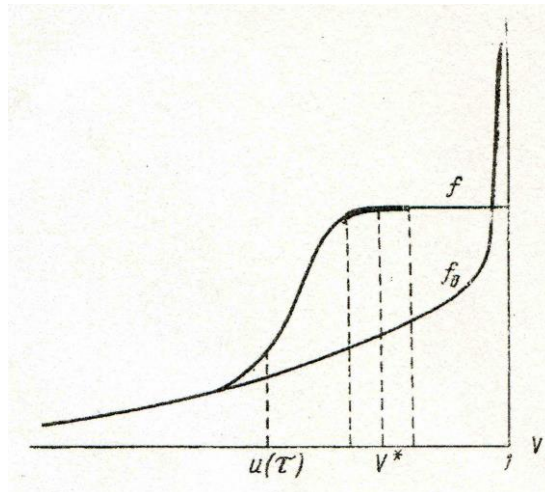


Рис. 3

Ширина фронта волны η_1 мала по сравнению с расстоянием, пройденным волной, $1-u$. На расстоянии η_1 функция распределения f быстро увеличивается от начального значения f_0 до некоторого значения $f(V_0, \tau)$ (см. рис. 3), которое будет определено ниже, а затем почти не меняется. По мере продвижения волны $f(V_0, \tau)$ и форма волны меняются, но эти изменения происходят за время масштаба τ . Поэтому на фронте волны

$$\left| \frac{\partial f}{\partial \tau} \right| \ll \left| \dot{u} \frac{\partial f}{\partial \eta} \right|, \quad \left| \frac{\partial w}{\partial \tau} \right| \ll \left| \frac{\partial w}{\partial \eta} \dot{u} \right|.$$

С этой точностью уравнение (5) на фронте волны можно упростить и записать как

$$-\frac{\partial w}{\partial \eta} \dot{u} = w u^2 \frac{\partial f}{\partial \eta}, \quad (19)$$

а, интегрируя его один раз, получим

$$f(\eta) - f_0(u) = -\frac{\dot{u}}{u^2} \ln \frac{w(\eta)}{w(u)}. \quad (20)$$

Величина $w(u, \tau)$ определяется уровнем шумов в точке u в момент прихода в эту точку фронта волны. Следует подчеркнуть, что если линейный инкремент в этой точке отличен от нуля, то $w(u)$ нужно вычислять по формуле линейной теории, так как по определению $w(u)$ берется в точке, где функция распределения f равна начальной $f_0(u)$ и квазилинейные эффекты еще не существенны.

Уравнение (7) в переменных μ записывается следующим образом:

$$f(\eta) - f_0(\eta) = \frac{\partial(w - w_0(\eta))}{\partial \eta}. \quad (21)$$

В области фронта с принятой нами точностью можно заменить в этой формуле $f_0(\eta)$ на $f_0(u)$, так как $f_0(\eta) - f_0(u) = \eta \partial f_0 / \partial V$, и пренебречь $\partial w_0 / \partial \eta$ по сравнению с $\partial w / \partial \eta$, после чего, подставляя выражение (20) для $f(\eta)$ в формулу (21), получим

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = -\frac{\dot{u}}{u^2} \ln \frac{w(\eta)}{w(u)}. \quad (22)$$

Интеграл уравнения (22) имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{\dot{u}}{u^2} w(u) \left[\text{li} \left(\frac{w(\eta)}{w(u)} \right) - \text{li}(2) \right]. \quad (23)$$

В той области значений η , где $\ln(w(\eta)/w(u)) \gg 1$, решение уравнения (22) можно приближенно, с «логарифмической точностью», записать следующим образом:

$$w = -\frac{\dot{u}}{u^2} \eta \ln \left(-\frac{\dot{u}}{u^2} \eta \ln \frac{w(V^*)}{w(u)} \right). \quad (24)$$

(V^* определено на рис. 3)

Закон изменения функции распределения на фронте волны с той же точностью имеет вид

$$f = f_0 - \frac{\dot{u}}{u^2} \ln \left(-\eta \frac{\dot{u}}{u^2} \ln \frac{w(V^*)}{w(u)} \right), \quad (25)$$

т. е. величина $f - f_0$ имеет вид почти ступеньки. Выражения (23), (24) и (25) оправдывают сделанные при выводе формулы (22) предположения, что форма фронта волны меняется слабо, лишь по мере изменения u .

Такая аппроксимация несправедлива на границе волны в окрестности точки $\eta = 0$ ($V = u$). Закон, по которому w стремится к $w(u)$, можно легко установить, разлагая $\ln(w/w(u))$ в предположении, что $(w - w(u))/w(u) \ll 1$. После этого, интегрируя уравнение (22), получим

$$w - w(u) = w(u) \exp \left\{ -\eta \frac{\dot{u}}{u^2 w(u)} \right\}.$$

Таким образом, w стремится к $w(u)$ очень быстро, так как $w(u)$ по условию - малая величина. По этой причине в формуле (22) действительно можно было пренебречь членом $\partial w_0(\eta)/\partial \eta$.

Теперь определим решение справа от точки сшивания $V = V^*$ (см. рис. 3). Здесь в первом приближении можно считать, что функция распределения электронов по скоростям представляет собой плато, высота которого зависит от времени, т. е. $f = c(\tau)$. Для определения следующего приближения воспользуемся уравнением (4). Подставляя в него $f = c(\tau) + \delta f$, получим

$$\delta f = \dot{c} \int_v^1 \frac{1-V'}{V'^2 w(V')} dV'. \quad (26)$$

Если в подынтегральном выражении заменить V на u , а $w(V')$ на $w(V^*)$, где V^* - точка, в которой сшиваются два решения, то δf только увеличится. Оценивая таким способом δf , мы можем найти область значений V , в которой выполняется неравенство $|\delta f| \ll c(\tau)$:

$$c \gg \delta f \sim |\dot{c}| \frac{(1-u)^2}{2u^2 w(V^*)}. \quad (27)$$

Величину функции распределения в области плато можно связать с координатой фронта волны u . Так как фронт волны предполагается узким по сравнению с $1-u$, то закон сохранения числа частиц можно записать в виде

$$(1-u)c = \int_u^1 f_0 dV. \quad (28)$$

Отсюда следует, что

$$\dot{c}/c \sim \dot{u}/(1-u). \quad (29)$$

Выражая в соотношении (27) c через u и подставляя значение $w(V^*)$ из формулы (24), получим

$$(1-u)/\ln \frac{w(V^*)}{w(u)} \ll \eta. \quad (30)$$

С «логарифмической точностью» в оценке (30) можно заменить $\ln[w(V^*)/w(u)]$ на $\ln[w(1)/w(u)] \ln[w(i)/w(u)]$. Таким образом, $f = c(\tau)$ для всех значений $\eta = V - u$, удовлетворяющих условию (30).

Так как $\ln[w(1)/w(u)] \gg 1$, то существует область значений η , для которых условие (30) и условие узости фронта $\eta \ll 1-u$ могут быть одновременно выполнены (см. рис. 3). Сошьем функцию распределения в какой-либо точке $V = V^*$ этой области. Из уравнений (21) и (28) следует $[w(V^*) \gg w(u)]$:

$$f(V^*) = f_0(V^*) + \frac{\partial w}{\partial \eta} = \frac{1}{1-u} \int_u^1 f_0 dV.$$

Это уравнение можно упростить, полагая $f_0(V^*) \approx f_0(u)$, $w(V^*) \approx w(1)$. Относительная ошибка при этом не будет больше, чем $(V^* - u)/u \ll 1$. Тогда уравнение для определения закона движения волны примет следующий вид:

$$-\frac{\dot{u}}{u^2} \ln \frac{w(1)}{w(u)} + f_0(u) = \frac{1}{1-u} \int_u^1 f_0 dV. \quad (31)$$

Решим его, например, для уже рассмотренной выше задачи, когда $f_0 = \pi \delta(V - 1)$. В этом случае уравнение (31) принимает вид

$$-\frac{\dot{u}}{u^2} \ln \frac{w(1)}{w(u)} = \frac{\pi}{1-u}.$$

Интегрируя полученное уравнение по времени с логарифмической точностью, получим

$$\frac{1}{u} + \ln u - 1 = \pi \tau / \ln \frac{w(1)}{w(u)}.$$

Здесь отсчет времени ведется таким образом, что при $\tau = 0$ $u = 1$. Для того, чтобы сравнить этот результат с решением автомодельной задачи, надо рассмотреть те моменты времени, когда u близко к единице. Разлагая выражение слева по малости $1 - u \ll u$, получим уже известный нам закон движения (16):

$$1 - u / \sqrt{\tau} = \text{const.}$$

Если $u \ll 1$, то

$$\tau u = \text{const.}$$

Следует подчеркнуть, что результаты, полученные в разделе 3, справедливы лишь, когда в каждый момент времени $\ln[w(1)/w(u)] \gg 1$, где $w(u) = w_0^0 e^{\gamma_0(u)\tau}$. Здесь величины $w(1)$ и w_0^0 определяются уровнем шумов в конечном и начальном состояниях, а $\gamma_0(u)$ - инкремент, вычисленный по начальной функции распределения. Это заведомо не так, если начальная функция распределения такова, что инкремент γ_0 во всей области неустойчивости одинаков. В этом случае релаксация произойдет за время $1/\gamma_0$ после того, как шумы вырастут до уровня, близкого к конечному.

Если исключить из рассмотрения этот частный случай, то шумы прежде всего вырастут в окрестности точки V , где линейный инкремент $\gamma_0(V)$ максимален. Таким образом, возникнет ситуация, когда в некоторой области V шумы велики по сравнению с шумами в других областях. Это, как мы видели ранее, приводит к увеличению крутизны функции распределения и распространению волны в пространстве скоростей.

Отметим следующее обстоятельство, существенно ограничивающее область применимости развитой выше теории. Функция распределения при не очень малых отношениях n_1/n_0 имеет на фронте очень большие производные $\partial f / \partial V$, и, следовательно, инкремент, определяемый формулой (2), велик и формально может стать больше частоты ω_0 . В действительности выражение (2) для инкремента и квазилинейное

уравнение (1) для достаточно крутых функций распределения несправедливы.

Так, более точное уравнение для инкремента имеет вид

$$\frac{2\gamma}{\text{Re } \omega} = \gamma \frac{\omega_0^2}{k} \int \frac{\partial F / \partial v}{(\text{Re } \omega - kv)^2 + \gamma^2} dv \quad (32)$$

(для слабых пучков $\text{Re } \omega \approx \omega_0 \text{Re}$).

Если функция распределения слабо меняется на масштабе γ/k в окрестности точки $v = \text{Re } \omega / k$, то производную $\partial F / \partial v$ можно вынести за знак интеграла, а оставшийся интеграл равен $\pi/|k|\gamma$.

Следовательно, в этом случае можно пользоваться выражением для γ , стоящим в формуле (2), когда значение инкремента в точке $k - \omega_0 / v$ связывается со значением функции $\partial F / \partial v$ в точке v . Такая аппроксимация интеграла, стоящего в правой части уравнения (32), справедлива, если

$$\frac{\partial^2 F}{\partial v^2} \frac{\gamma}{k} \ll \frac{\partial F}{\partial v}.$$

Подставляя в это неравенство выражение для γ , использованное в формуле (2), получим

$$V^3 \frac{n_1}{n_0} \frac{\partial^2 f}{\partial V^2} \ll 1 \quad \text{или} \quad \frac{n_1}{n_2} \frac{\partial^2 f}{\partial V^2} \ll 1, \quad \text{так как } V \approx 1. \quad (33)$$

Здесь $V = v/v_0$, $f = \pi v_0 F n_0 / n_1$.

Эта (локальная) связь теряется, если в окрестности точки $v_m = \text{Re } \omega / k$ на длине γ/k функция $\partial F / \partial v$ изменяется существенно. В этом случае в интеграл в уравнении (32) дают вклад все частицы со скоростями $|v - v_m| \leq \gamma/k$.

Если функция распределения представляет собой ступеньку, изображенную на рис. 1, то инкремент равен следующей величине:

$$\gamma = \left(\frac{n_1}{n_0} \frac{v_m}{2(v_0 - v_m)} \right)^{1/2} \omega_0. \quad (34)$$

Это выражение справедливо, если ширина переходной области ступеньки δv меньше, чем γ/k , т.е. если

$$\frac{\delta v}{v_0} \ll \left(\frac{n_1}{n_0} \frac{v_m}{2(v_0 - v_m)} \right)^{1/2}.$$

Неустойчивость ленгмюровских колебаний с таким инкрементом часто называют гидродинамической. Она исследована в работе [7], а квазилинейная стадия релаксации узкого пучка с $c_{1e} / v_0 \leq (n_1 / n_0)^{1/3}$ рассмотрена в работе [8]. Мы сразу исключили из рассмотрения начальную стадию релаксации пучка неравенством $c_{1e} / v_0 \geq (n_1 / n_0)^{1/3}$.

Однако вследствие обнаруженного нами эффекта увеличения крутизны «гидродинамическая стадия» раскачки ленгмюровских колебаний пучком

может быть существенна на всех этапах процесса релаксации. Рассмотрение этой стадии - предмет особой работы.

Процесс релаксации описывается уравнениями (1) - (3) от начала до конца лишь для очень слабых пучков, когда даже в области максимальной производной $\partial F / \partial v$ справедлива «локальная связь».

Подставляя в неравенство (33) конкретное выражение для функции распределения (12), получим условие применимости нашей теории связывающее энергию частиц пучка и начальную плотность энергии шумов:

$$\varphi_0 \left(\ln \frac{1}{\varphi_0} \right)^3 \geq \left[\frac{n_1}{n_0} (1-u)^{-3} \right]^{1/2}. \quad (35)$$

Так как $n_1 / n_0 (1-u)^3 \ll 1$ с самого начала, то в правой части неравенства (35) стоит малая величина (при $1/(1-u) \sim 1$, она просто равна $\sqrt{n_1 / n_0}$).

Качественная картина процесса квазилинейной релаксации, по-видимому, существенно не меняется и в случае плотных пучков. Действительно, как было выяснено выше, наличие пологой части за фронтом связано с медленностью движения фронта. С другой стороны, скорость движения фронта определяется скоростью нарастания шумов. Максимальную скорость нарастания в случае плотных пучков можно оценить, приняв для инкремента максимальное значение (34), что соответствует функции распределения в виде ступеньки. В этом случае, в отличие от «локального», шумы с волновым вектором k начинают нарастать, когда фронт волны, движущейся со скоростью v_m , дойдет до точки $v \approx \omega / k + \gamma / k$ и прекратят свой рост, когда волна сместится на расстояние $\sim 2\gamma / k$. Энергия шумов на этой длине увеличится в следующее число раз:

$$\exp \left\{ 2\gamma \frac{dv}{\dot{v}_m} \right\} \approx \exp \left\{ 4 \frac{\gamma^2}{k \dot{v}_m} \right\} \approx \exp \left\{ \frac{2}{i(1-u)} \right\}.$$

Если считать, с другой стороны, что шумы выросли в $w(1)/w(u)$ раз и воспользоваться только что полученным выражением, то скорость движения фронта волны в пространстве скоростей i оказывается равной найденной раньше.

4. Добавление (9 августа 1966 г.). Экспериментальное наблюдение временного процесса релаксации пучка электронов затруднено вследствие того, что время релаксации весьма мало. Как правило, оно меньше времени пролета электронами пучка длины установки [9]. Эксперименту больше соответствует другая постановка задачи, когда исследуется установившаяся функция распределения частиц и шумы, возникающие при

стационарной инжекции слабого пучка электронов в полупространство, занятое плазмой, нормально к границе раздела.²

Будем отсчитывать координату x от границы в глубь плазмы. При $x=0$ функция распределения электронов по скоростям имеет вид, изображенный на рис. 1 ($x=0$ соответствует $t=0$ во временной задаче). Состояние системы плазма - пучок, возникающее при стационарной инжекции, описывается уравнениями, которые получаются из системы (1) - (3), если в уравнении (1) заменить $\partial f / \partial t$ на $v \partial f / \partial x$, а в уравнении (2) $\partial \varepsilon_k / \partial t$ на $(\partial \omega / \partial k)(\partial \varepsilon_k / \partial x)$. Последнее выражение описывает изменение спектральной плотности энергии шумов из-за сноса шумов с групповой скоростью $v_{gp} = \partial \omega / \partial k$ вдоль оси x . Полученная система уравнений аналогична исследованной в предыдущих разделах. В частности, существует квазилинейный интеграл

$$[f(V, x) - f(V, 0)]V = \frac{\partial}{\partial V} \left[\frac{v_{gp}}{v_0} (w(V, x) - w(V, 0)) \right]. \quad (36)$$

В этой формуле и везде ниже групповая скорость вычисляется в точке $k = \omega_0 / v$ и поэтому является функцией переменной V . Считается, что v_{gp} определяется свойствами всей плазмы и не зависит от координаты x . С помощью уравнения (36) можно исключить функцию распределения из системы квазилинейных уравнений и получить уравнение для $w(V, x)$:

$$\frac{v_{gp}}{v_0} \frac{\partial w}{\partial \bar{x}} = V^2 w \frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial V} \left[\frac{v_{gp}}{v_0} (w - w(V, 0)) \right] \right) + V^2 w \frac{\partial f(V, 0)}{\partial V} \quad (37)$$

вместо уравнения (8). Безразмерная координата \bar{x} определяется как $\bar{x} = \omega_0 x n_1 / v_0 n_0$. Вместо граничного условия (10) получается следующее соотношение:

$$w(1, \bar{x}) - w(1, 0) = \frac{\pi v_0}{v_{gp}(1)}. \quad (38)$$

Система уравнений (36) - (37) с граничным условием (38) имеет автомодельное решение, описываемое уравнением (13) для функции

$$\varphi(\xi) = \frac{w(V, \bar{x})}{\pi} - \frac{w(V, 0)}{\pi}.$$

Решение уравнения (13) при больших значениях $\ln(\varphi / \varphi_0)$ имеет вид (15).

Однако теперь переменная ξ есть

$$\xi = \frac{1 - V}{\sqrt{\pi \bar{x}}},$$

² Начальная нестандартная фаза этого процесса рассматривалась в работе Я.Б.Файнберга и В.Д.Шапиро [10].

а константа ξ_0 находится из граничного условия $\varphi(0) = \pi v_0 / v_{ep}$ (1), следующего из соотношения (38). Расстояние x на котором ширина пучка становится равной Δv , есть

$$x = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^2 \frac{n_0}{n_1} \frac{v_{ep}(v_0)}{\omega_0} \ln \frac{1}{\varphi_0}.$$

Автомодельность имеет место, пока $\Delta v \ll v_0$, т. е. в области

$$x \ll \frac{n_0}{n_1} \frac{v_{ep}}{\omega_0} \ln \frac{1}{\varphi_0}.$$

Воспользовавшись аналогией между временной и пространственной задачами, можно найти решение, справедливое для всех значений Δv и x .

На рис. 1 и 4 приведены графики функции распределения электронов пучка и спектральной плотности энергии ленгмюровских колебаний для случая, когда $\ln(\varepsilon_k / \varepsilon_0) \gg 1$. Функция распределения изображена для трех значений безразмерной координаты $\bar{x} = \omega_0 x n_1 / v_0 n_0$. Граница $u(x)$ функции распределения в пространстве скоростей определяется из уравнения

$$\frac{1}{u^2} + 2 \ln u - 1 = \frac{4\pi \bar{x}}{\ln(1/\varphi_0)} \cdot \frac{2}{3} \frac{V_0^2}{c_e^2},$$

если $\partial \omega / \partial k = (3/2) c_e^2 k \omega_0^{-1}$. Спектральная плотность, измеряемая в единицах $n_1 m v_0^2 / 2$, как функция безразмерной координаты \bar{x} приведена для трех значений фазовых скоростей. Ее аналитическое выражение таково:

$$w = \frac{\pi v_0}{v_{ep}(v)} \frac{V^2 - u^2}{1 - u^2}.$$

За точкой

$$x_m \approx \ln \frac{1}{\varphi_0} \left(x = \frac{v_0}{\omega_0} \frac{n_0}{n_1} \ln \frac{1}{\varphi_0} \right)$$

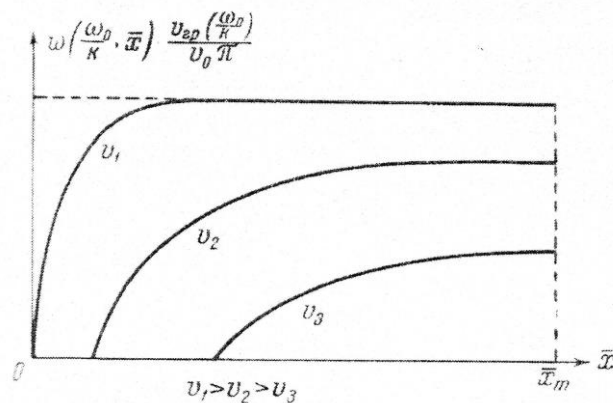


Рис. 4

нарастание колебаний прекращается, так как функция распределения становится устойчивой. Рис. 1 и 4 будут соответствовать эксперименту в случае, когда колебания поглощаются на противоположной от инжектора стенке.

Мы умышленно не выписывали явного выражения для групповой скорости. Для полупространства групповая скорость равна $v_{gp} = (3/2)c_e^2 k \omega_0^{-1}$. В реальных экспериментальных условиях, когда диаметр пучка сравним с длиной волны и плазма помещена в магнитное поле, групповая скорость может определяться этими факторами и быть значительно больше, чем $(3/2)c_e^2 k \omega_0^{-1}$. Кроме того, групповая скорость в условиях, когда $\int \varepsilon_k dk > n_0 T_e$ (а приведенные выше формулы еще справедливы) зависит от энергии шумов [11]. Из требования, чтобы функции f и w слабо менялись на длине волны, необходимого для применимости квазилинейной теории следует, что полученные выше результаты справедливы, когда $n_i v_0 / n_0 v_{gp} \ll 1$.

В заключение приносим благодарность Д. Д. Рютову за полезные обсуждения.

Литература

1. А.А. Веденов, Е.П. Велихов, Р.З. Сагдеев. Ядерный синтез, Приложение, 2, 465, 1962.
2. W. Drummen d, D. Pines. Ядерный синтез. Приложение, 3, 1049, 1962.
3. А.А. Веденов, Е.П. Велихов, Р.З. Сагдеев. УФН, 73, 701, 1961.
4. А.А. Веденов. Введение в теорию слаботурбулентной плазмы, в кн. Вопросы теории плазмы, 3, Госатомиздат, 1963.
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Механика сплошных сред, Гостехиздат, 1953.
6. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям, изд. «Наука», 1965.
7. Я.Б. Файнберг. Атомная энергия, 11, 313, 1961.
8. В.Д. Шапиро, В.И. Шевченко. ЖЭТФ, 42, 1515, 1962.
9. И.Ф. Харченко, Я.Б. Файнберг и др. Ядерный синтез, Приложение, 2, 521, 1962.
10. Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро. В сб. Взаимодействие пучков заряженных частиц сплазмой, Киев, 1965.
11. А.А. Веденов, В.Д. Гордеев, Л.И. Рудаков. Доклад на конференции по физике плазмы и контролируемым термоядерным реакциям, КАЛЭМ, 1965.

ФИЗИКА ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ

А.А. Иванов

Физика плазмы, 1975, т. 1(1), с. 147-159.

Введение.

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических работ по физике и химии газового разряда [1], заметного прикладного значения эти исследования не приобрели вплоть до последнего времени, что было связано отсутствием достаточно мощных дуговых и высокочастотных генераторов. В последнее десятилетие такие генераторы как постоянного, так и переменного тока высокой частоты были созданы. Это привело к тому, что некоторые химические реакции и процессы, проходящие в слабоионизованной плазме, оказались весьма интересными не только в научном, но и в прикладном отношении. В качестве примера можно привести процесс получения в дуговом плазматроне ацетилена C_2H_2 из метана CH_4 [2]. Предпринятые в дальнейшем попытки применить аналогичные устройства для других химических процессов натолкнулись на серьезные трудности, которые были, по-видимому, связаны с недостаточной разработанностью научных основ физики химически активной плазмы. Действительно, в системах, применявшихся для изучения реакций, как правило, условия выбирались таким образом, что система была близка к равновесной, так как плотность газов была достаточно велика. Роль электронов плазмы, плотность которых определяется по формулам Саха [3], сводилась в сущности к тому, что они обеспечивали нагрев среды за счет джоулевой диссипации. Таким образом, плазма обеспечивала более равномерный нагрев среды до сравнительно невысоких температур, порядка десятых долей электрон-вольта в равновесных условиях. Понятие и концепции кинетики химических реакций [4] при этом позволяли предсказывать химический состав среды при данной температуре T поддерживаемой за счет внешних источников энергий.

Можно сказать, что при таком подходе задача о химических реакциях в плазме сводилась к обычным задачам равновесной высокотемпературной химии, с этим были, по-видимому, связаны те неудачи, которые имели место при использовании таких систем для разложения соединений с большой энергией связи, например CO , окислов тугоплавких металлов и т.д. [5], либо температура среды была много меньше энергии связи (например, энергия связи CO составляет 11 эВ). Стремление иметь в системах высокую плотность объясняется, с одной стороны, желанием иметь как можно более высокую производительность, а с другой - тем, что при высокой плотности реализуются предсказуемые состояния системы.

Равновесные системы.

В настоящее время наиболее распространенные генераторы, используемые для проведения химических реакций, — дуговой плазмотрон, плазмотрон факельного типа, высокочастотный и сверхвысокочастотный плазмотроны. Самый мощный из них дуговой, представляющий собой два электрода, между которыми зажигается дуга при напряжении порядка нескольких сотен вольт. Ток при этом достигает 10 кА. Дуга зажигается при достаточно близко расположенных электродах - расстояние порядка 1 см. Газ продувается через дугу, и для того, чтобы увеличить производительность системы, необходимо увеличивать плотность поступающего в горячую зону газа. Ввиду того, что плотность частиц в системе велика, велика и частота столкновении частиц между собой; следовательно, можно считать, что система близка к равновесной. В этих условиях справедливы уравнения химической термодинамики, которые позволяют определить концентрации элементов и соединений при данной температуре. Если теперь создать горячую зону таким образом, что в месте наибольшей концентрации нужного продукта будет находиться граница горячей зоны, то можно зафиксировать конечный продукт. Разумеется, граница горячей зоны должна быть при этом достаточно резкой, чтобы система адиабатически не перешла в исходное равновесное состояние.

Факельный плазмотрон отличается от дугового тем, что разряд между электродами зажигается при помощи токов высокой частоты, которые замыкаются через вакуум. Мощность таких плазмотронов примерно на порядок меньше мощности дуговых.

Высокочастотный плазмотрон представляет собой индуктор, по которому протекают токи высокой частоты, нагревающие газ или смесь реагирующих газов, пропускаемых через индуктор вдоль его оси. Частота при этом порядка 1 МГц, а мощности плазмотронов порядка нескольких сотен киловатт.

Наконец, сверхвысокочастотный плазмотрон представляет собой генератор, излучающий дециметровые волны в смесь газов. Нагрев смеси волнами способствует проведению химических реакций. Мощности СВЧ - плазмотронов примерно на порядок ниже мощностей ВЧ - плазмотронов.

Таким образом, в существующих в настоящее время установках большой мощности среда, как правило, равновесная или почти равновесная. Основная задача заключается в том, чтобы правильно подобрать тепловой режим для электродов и индуктора, работающих в среде, состоящей из смеси реагирующих газов, электронов и ионов, при помощи которых энергия от внешних источников диссипируется в тепло. Поскольку электроды находятся в контакте со средой с большим теплосодержанием, они начинают гореть. Это не позволяет при больших плотностях газовой смеси, представляющих практический интерес, поднять температуру среды до значений, при которых вещества с большой энергией связи разлагаются до конца. Большие плотности - необходимое следствие малых размеров

зон, в которых существует плазма. Действительно, количество прореагировавших в единицу времени молекул определяется выражением $Q = nu_n S$, где n - плотность газа, u_n - его скорость и S - площадь поперечного сечения зоны реакции. Как уже отмечалось, расстояние между электродами в дуговом плазмотроне составляет величину меньше или порядка 1 см, а площадь поперечного сечения дуги оказывается порядка 1 см². Скорость u_n не превышает скорости звука, поэтому величина Q будет тем больше, чем больше плотность газа. Аналогичная ситуация имеет место и в высокочастотном плазмотроне, где зона реакции, совпадающая с областью, в которой существует плазма, определяется величиной скин-слоя, размеры которого также меньше или порядка 1 см. Поэтому площадь S также составляет величину порядка 1 см². Слабоионизованная плазма и газ, обладающие большим теплосодержанием, находятся в непосредственном контакте с электродами или индуктором, приводя к их сильной эрозии.

Довольно сложной оказывается также проблема резкого неадиабатического охлаждения, имеющая целью фиксацию нужного элемента и соединения. Газ, проходящий зону реакции, нагревается до температур порядка долей электрон-вольта, а затем теплосодержание должно быть резко уменьшено за время, меньшее времени рекомбинации. Длина свободного пробега молекулы $\lambda = 1/n\sigma$, где n - плотность газа, а σ - сечение столкновений, составляющее величину порядка 10⁻¹⁵ - 10⁻¹⁶ см² [6]. К рекомбинации диссоциированных продуктов приводят лишь тройные столкновения, так как иначе не выполняется закон сохранения импульса. При этом в объеме, занятый молекулой $V_m \sim 10^{-23}$ см³, должны попасть одновременно еще две молекулы. Если теперь учесть, что на одну молекулу приходится в среднем объем $1/n$, то длина, на которой произойдет тройное столкновение, будет по порядку величины равна $\frac{1}{n\sigma} \frac{10^{23}}{n}$. Для концентрации молекул порядка 10¹⁹ при сечении столкновения $\sigma \approx 10^{-15}$ см² длина, на которой произойдет тройное столкновение, составит величину порядка 1 см. На этой длине теплосодержание должно уменьшиться в несколько раз. Учитывая, что в зоне реакции температура составляет доли электрон-вольта, получаем необходимое значение градиента температуры порядка 10⁴ град/см. Создание таких резких градиентов температуры представляет собой довольно сложную техническую задачу. Отметим, что излучательная рекомбинация, связанная с передачей избыточной энергии фотону, приводит примерно к таким же значениям градиента температуры [7]. Эта трудность - одна из основных, лежащих на пути использования равновесных плазмохимических устройств.

Таким образом, описанные плазмотроны, работающие в условиях, близких к равновесным, обладают рядом существенных недостатков, для преодоления которых необходимо переходить в неравновесные режимы,

уменьшая плотность газа. При этом для сохранения того же значения полного потока газа Q необходимо увеличить поперечное сечение разряда и существенно увеличить температуру электронов до нескольких десятков электрон-вольт.

Если бы удалось осуществить такие неравновесные условия, стало бы возможным производить реакции, неосуществимые в равновесных системах. Условия фиксации конечного продукта были бы сильно облегчены, так как длина, на которой происходит тройное столкновение, пропорциональна $1/n^2$.

Мощный электронный пучок в слабоионизованной плазме.

Значительный интерес представляет в этом отношении система электронный пучок - плазма, так как она оказывается свободной от ряда указанных выше недостатков. Действительно, в течение ряда лет в физике плазмы изучается взаимодействие электронного пучка с плазмой, удерживаемой в магнитной ловушке типа пробкотрон [8-10]. Электронный пучок с энергией порядка нескольких десятков электрон-вольт и током, достигавшим нескольких десятков ампер, инжектировался в течение времени порядка 10^{-3} сек либо в заранее приготовленную плазму, удерживаемую пробкотроном, либо в нейтральный газ малой плотности. Эти установки были предназначены для нагрева плазмы электронным пучком, причем наибольший интерес для исследователей представлял случай полностью ионизованной плазмы относительно небольшой плотности (порядка 10^{12} - 10^{13} см⁻³), которая могла считаться бесстолкновительной. В том случае, если пучок инжектировался в нейтральный газ малого давления и энергии пучка было достаточно для полной ионизации газа, образовывалась полностью ионизованная плазма во всем объеме пробкотрона. Пучок инжектировался обычно через пробку вдоль магнитного поля. Магнитное поле в таких установках обычно составляло в центре ловушки 1-2 кГс и в пробках до 10 кГс. [8].

Многочисленные эксперименты, проведенные в различных лабораториях, дали следующие основные результаты. Во-первых, происходит значительный нагрев электронов плазмы, причем образуются две группы электронов, отличающиеся средней энергией. Очень малая доля электронов имеет энергии, превышающие 100 кэВ, в то время как основная часть электронов имеет температуру порядка 100 эВ. В бесстолкновительном случае в отличие от равновесных систем под температурой мы понимаем среднюю хаотическую энергию частицы.

Указанные параметры достигались лишь в том случае, когда электронный пучок терял заметную долю своей энергии при прохождении через бесстолкновительную плазму. Такие потери могли быть связаны лишь с развитием неустойчивости, так как классические длины свободных пробегов были много больше размеров установки. На это указывают также

результаты измерений вида функции распределении электронов пучка в зависимости от расстояния, от места инжекции [11].

Таким образом, механизм нагрева плазмы может быть представлен следующим образом: электронный пучок из-за неустойчивости передает свою энергию плазменным волнам. Волны затухают, передавая свою энергию электронам плазмы и тем самым нагревая их. Так как плазменная

частота $\omega_{pe} = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m} \right)^{1/2}$ (n_e - плотность электронов) довольно велика,

процесс нагрева электронов плазмы может быть достаточно быстрым. В частности нагрев может происходить за время, меньшее, чем ν_{en}^{-1} (ν_{en} - частота неупругих столкновений электронов с молекулами). Выбрав соответствующие условия, можно пропускать нейтральный газ не слишком большой плотности через пробкотрон и тем самым проводить, например, реакцию диссоциации электронным ударом. Диссоциация, так же как и ионизация электронным ударом, - пороговые реакции, сечение которых достигает 10^{-16} см² при энергиях электронов порядка 30 ÷ 100 эВ. При этом одновременно происходит возбуждение нейтральных частиц электронами плазмы до высоких значений квантовых чисел n , поэтому в такой необычной для традиционной химии системе могут идти также реакции замещения типа $AB + C \rightleftharpoons AC + B$, для которых не нужны тройные столкновения. Следует отметить, что эти реакции могут идти с большой скоростью, так как при столкновениях сильновозбужденных частиц сечение пропорционально n^4 [12]. В принципе при $n \sim 4$ может идти речь даже о реакциях синтеза с учетом тройных столкновений при плотности газа порядка 10^{16} , так как длина тройного столкновения для возбужденных частиц обратно пропорциональна величине n^{10} . Действительно, общая формула для тройного столкновения имеет вид

$$\lambda_T \propto \frac{1}{n_0 \sigma} \cdot \frac{1}{n_0 V_0}, \quad (1)$$

где n_0 - плотность нейтральных частиц, σ - сечение столкновения, V_0 - объем, занимаемый одной частицей, молекулой или атомом, а $\frac{1}{n_0}$ - часть

пространства, приходящаяся на одну частицу. При достаточно больших значениях квантового числа n атом или молекулу можно считать находящим в одном из ридберговских состояний [12]. Радиус частицы при этом, как и для атома водорода, становится равным $r_0 n^2$, где r_0 - борковский радиус электрона. Сечение увеличивается пропорционально n^4 [12], а объем V_0 - пропорционально n^6 . Таким образом, $\lambda_T \propto \frac{1}{n^{10}}$. Если пучок

достаточно мощный, то, как показывают результаты работ [13], плотность электронов с энергией 100 эВ может достигать значений 10^{15} см⁻³ при

плотности нейтрального газа до 10^{17} см⁻³ (магнитное поле при этом должно быть увеличено до 10 кГс).

Поперечное сечение такого разряда может быть достаточно большим, так как длина разряда достигает 10^2 см, а радиус плазмы в принципе может быть порядка 10 см. Таким образом, площадь горячей зоны, через которую можно пропускать газ, составит примерно 10^3 см², что много больше, чем в случае разрядов в равновесных плазмотронах. С прикладной точки зрения такая система будет представлять интерес только в стационарном варианте. Поэтому область электронной пушки должна быть снабжена системой дифференциальной откачки, для поддержания в области катод - анод давления порядка $10^{-5} \div 10^{-6}$ тор [8].

С точки зрения химии такая система кажется весьма перспективной, так как нагрев электронов плазмы обеспечивается за счет пучковой неустойчивости и взаимодействия электронов плазмы с волнами, в то время как химия процесса обеспечивается столкновениями электронов с молекулами и атомами и молекул и атомов между собой. Оценим эффективную длину, на которой происходит взаимодействие электронов с молекулами. Если струя газа с плотностью n_n инжектируется в горячую зону со скоростью u_n , то при стационарной инжекции из уравнения непрерывности следует

$$\frac{d}{dx} n_n u_n = -\sigma_{en} v_{Te} n_e n_n. \quad (2)$$

Здесь v_{Te} - тепловая скорость электронов плазмы, а σ_{en} - сечение столкновения электрона с молекулой. Так как масса электрона много меньше массы нейтрала, скорость u_n при столкновении с электроном практически не изменится и может считаться не зависящей от x - координаты вдоль направления распространения струи. Характерная длина, на которой происходит диссоциация,

$$L_D \propto \frac{1}{n_e \sigma v_{Te}} u_n. \quad (3)$$

Сечение диссоциации молекулы электроном с энергией порядка 100 эВ составляет примерно 10^{-16} в см².

Учитывая, что скорость инжекции газа порядка 10^5 см/сек, в то время как тепловая скорость электронов примерно $6 \cdot 10^8$ см/сек, получим, что при плотности электронов порядка 10^{13} см⁻³ длина диссоциации составит доли сантиметра.

Таким образом, для создания условий эффективного взаимодействия необходимо иметь достаточно большую концентрацию энергичных электронов плазмы. Эти электроны создаются при помощи пучковой неустойчивости. Поэтому большое значение имеет вопрос о раскатке такой неустойчивости в слабоионизованной плазме.

Пучковая неустойчивость в слабоионизованной плазме

Важным эффектом при прохождении электронного пучка через плазму является выбывание частиц пучка из первоначального фазового объема - эффект, полностью отсутствующий в бесстолкновительной плазме. Пусть пучок, движущийся со скоростью u , пронизывает слой слабоионизованной плазмы длиной L . Длина свободного пробега электронов пучка - $\lambda_b = 1/n_n \sigma_b$, т. е. столкновения происходят в основном с нейтралами, а σ_b - эффективное сечение столкновений для энергии, равной энергии электронов пучка. Это означает, что на длине порядка λ_b происходит заметное убывание электронов пучка, т.е. электронов, занимающих определенный объем в фазовом пространстве. Электрон пучка, столкнувшись с нейтральной частицей, изменяет направление своего движения на угол порядка единицы [14]. Таким образом, можно считать, что число электронов пучка уменьшается, в то время как скорость их остается постоянной. Уравнение непрерывности для электронов пучка может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial n_b}{\partial t} + \text{div}(n_b v_b) = -v_b n_b. \quad (4)$$

Уравнение движения для частиц пучка не должно содержать силы трения, так как электроны пучка при столкновении не тормозятся, а выбывают из пучка.

$$\frac{\partial v_b}{\partial t} + (v_b \nabla) v_b = -\frac{e}{m} E. \quad (5)$$

Что касается электронов плазмы, то они при столкновениях будут терять скорость, но полное число их не меняется, так как в данном случае нас не интересует определенная область в пространстве скоростей. Поэтому уравнения непрерывности и движения для электронов плазмы могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \text{div}(n_p v_p) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} + (v_p \nabla) v_p = -v_0 v_p - \frac{e}{m} E. \quad (7)$$

Здесь v_0 - частота столкновений электронов плазмы с нейтральными частицами, которая в слабоионизованной плазме много больше частоты столкновений с заряженными. Пользуясь еще уравнением Пуассона, мы получим полную систему уравнений, описывающую поведение пучка быстрых электронов в слабоионизованной плазме. Учет выбывания электронов из-за столкновений из первоначального фазового объема приводит к дополнительным математическим трудностям. В нулевом приближении, учитывая, что электроны движутся вдоль оси x со скоростью u , имеем в стационарном случае

$$u = \text{const}; \quad n_{b0} = n_{b0}^0 e^{-(v_b/u)x} = n_{b0}^0 e^{-(x/\lambda_b)}, \quad (8)$$

где n_{b0}^0 - плотность пучка электронов на входе в плазму при $x = 0$. В первом приближении будем считать, что все величины пропорциональны $f(x)e^{-i\omega t}$, так как невозмущенная концентрация пучка n_{b0} - функция координаты x . Учитывая, что для потенциальных возмущений, распространяющихся вдоль пучка, $E = e_x, E = -e_x(\partial\varphi/\partial x)$, (e_x - единичный вектор вдоль оси x), получим из уравнений (4) - (7) и уравнения Пуассона

$$\left[(-i\omega + \nu_b) + u \frac{\partial}{\partial x}\right]^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_0)}\right] - \left(\frac{\nu_b}{u} - \frac{\partial}{\partial x}\right) \omega_{be}^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

где

$$\omega_{pe} = \left(\frac{4\pi e^2 n_{0p}}{m}\right)^{1/2}, \quad \text{а} \quad \omega_{be}(x) = \left(\frac{4\pi e^2 n_{b0}(x)}{m}\right)^{1/2}.$$

Учитывая малость $\frac{n_{b0}(x)}{n_{p0}} \ll 1$, получим в нулевом приближении

$$\left[(-i\omega + \nu_b) + u \frac{\partial}{\partial x}\right]^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_0)}\right] = 0 \quad (10)$$

Решения, которые нас интересуют в данном случае, определяются равенством нулю последней скобки уравнения (10), так как они описывают ленгмюровские колебания плазмы. Полагая, что $\omega_{pe} \gg \nu_0$, получим

$$\omega = \omega_{pe} - i \frac{\nu_0}{2}.$$

Чтобы учесть пучок, можно воспользоваться методом, изложенным в работе [15]. Уравнение (9) можно условно записать в виде

$$(\hat{G} \hat{L}_0 + \hat{L}_1) \varphi = 0,$$

где операторы \hat{G} и \hat{L}_0 являются дифференциальными операторами.

$$\hat{G} = \left(-i\omega + u \frac{\partial}{\partial x} + \nu_b\right)^2,$$

$$\hat{L}_0 = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2}.$$

Оператор \hat{L}_1 также дифференциальный, имеющий малый параметр: либо $\frac{n_{b0}}{n_{p0}}$, либо $\frac{\nu_0}{\omega}$. Введем в уравнение (10) некоторую малую постоянную величину χ , так что

$$\hat{G}(\hat{L}_0 \varphi + \chi \varphi - \chi \varphi) + L_1 \varphi = 0$$

и собственную функцию φ можно искать в виде ряда $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$. Так как первое приближение φ должно быть линейно независимым от нулевого φ_0 , их можно выбирать так, чтобы $\int \varphi_0^*(x) \varphi_1(x) dx = 0$. Иными словами,

поправка должна быть ортогональна к собственной функции. Выберем теперь нулевое приближение следующим образом:

$$\hat{L}_0 \varphi_0 - \chi \varphi_0 = 0. \quad (11)$$

Далее, подставляя решение этого уравнения в исходное, получим в первом приближении

$$\hat{G} \hat{L}_0 \varphi_1 + \hat{G} \chi \varphi_0 + \hat{G} \chi \varphi_1 - \hat{G} \chi \varphi_1 + L_1 \varphi_0 = 0. \quad (12)$$

Отметим, что уравнения (11) и (12) описывают систему в нулевом и первом приближении. Указанный способ разбиения исходного уравнения на два позволяет найти дисперсионное соотношение, не вычисляя φ_1 . Умножим уравнение (12) справа на φ_0^* и проинтегрируем по x от 0 до L , т. е. по всему слою плазмы. Дальнейшие вычисления должны быть проведены для конкретного вида функции φ_0 , соответствующей заданным граничным условиям. В нулевом приближении из уравнения (11) имеем:

$$\varphi_0 = C_1 e^{ikx}, \quad \text{где} \quad k = \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}}.$$

Отметим, что эта функция будет соответствовать одинаковым граничным условиям на концах, если $k = 2\pi n/L$, где n - целое число. Условия неперодичности представляются для данной задачи наиболее естественными, так как в нулевом приближении левый конец ничем не отличается от правого. Далее, в силу того, что ленгмюровские колебания поглощаются на границе системы, можно не учитывать отраженных волн, и в нулевом приближении φ_0 представляет собой бегущую волну. Что касается первого приближения, то из условия полноты и ортогональности φ_1 , будет пропорционально $e^{ik_1 x}$, где $k_1 = 2\pi m/L$, m - целое число, не равное n , т. е. функция φ_1 также является периодической с периодом L . Исходя из вышесказанного, получим из уравнения (12)

$$\chi = \frac{\int_0^L \varphi_0^* \hat{L}_1 \varphi_0 dx}{\int_0^L \varphi_0^* \hat{G} \varphi_0 dx}.$$

Окончательно дисперсионное соотношение имеет вид:

$$1 = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} - \frac{i\nu_0}{\omega^3} \omega_{pe}^2 + \frac{\omega_{b0}^{02} \frac{\lambda}{L} \left(1 + \frac{2i\nu_b}{ku}\right) (1 - e^{-(\lambda/L)})}{(\omega + i\nu_b - ku)^2}. \quad (13)$$

Если длина свободного пробега электронов λ становится много больше размеров плазмы L , то уравнение (13) переходит в обычное уравнение для пучковой неустойчивости. В отличие от обычной пучковой неустойчивости, когда число частиц в пучке не убывает, знаменатель в последнем слагаемом уравнения (13) представляет собой полный квадрат, а не выражение типа

$$(\omega + i\nu_b - ku)(\omega - ku).$$

Вопрос о максимальном инкременте может быть решен так же, как и в случае бесстолкновительной плазмы. Наибольший интерес здесь представляет критерий неустойчивости. Подставляя, как обычно, значение частоты колебаний в уравнение (13) в виде [16]: $\omega = \omega_{pe} + \delta$, ($\delta \ll \omega_{pe}$) и разлагая по указанной малости, найдем уравнение для δ

$$\frac{2\delta}{\omega_{pe}} + \frac{i\nu_0}{\omega_{pe}} - \frac{\alpha \omega_{pe}^2 \left(1 + \frac{2i\nu_b}{ku}\right)}{(\omega_{pe} + ku + \delta + i\nu_b)^2} = 0, \quad \alpha = \frac{n_{b0}^0}{n_{p0}} \frac{\lambda}{L} (1 - e^{-(\lambda/L)}). \quad (14)$$

На пороге неустойчивости величина δ должна быть действительной, и, ввиду того, что волновое число k также действительно по постановке задачи, можно приравнять нулю порознь действительную и мнимую части уравнения (14).

$$\begin{aligned} & \delta^2(4\nu_b + \nu_0) + \delta[4\nu_b(\omega_{pe} - ku) + 2\nu_0(\omega_{pe} - ku)] + \\ & + \left[\nu_0(\omega_{pe} - ku)^2 - \nu_0\nu_b^2 - \alpha\omega_{pe}^3 \frac{\nu_b}{ku} \right] = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$2\delta(\omega_{pe} - ku + \delta)^2 - 2\nu_0(\omega_{pe} - ku + \delta)\nu_b - 2\delta\nu_b^2 - \alpha\omega_{pe}^3 = 0. \quad (16)$$

Решив квадратное уравнение (15) относительно δ , следовало бы подставить δ через k в уравнение (16) и определить пороговые значения $\delta_{пор.}$ и $k_{пор.}$. Однако решение уравнения (15) оказывается действительным при любых значениях входящих в него величин, что позволяет упростить схему расчета. Определим из уравнения (16) величину ku , которая заведомо должна быть действительной:

$$ku = \frac{\nu_0\nu_b - 2\delta(\omega_{pe} + \delta)}{2\delta} \pm \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\nu_0\nu_b)^2 + 4\delta^2\nu_b^2 + 2\delta\alpha\omega_{pe}^3}. \quad (17)$$

Мы видим, что величина ku при действительных значениях δ как параметра будет действительна в том случае, если подкоренное выражение в формуле (17) больше нуля. При выполнении неравенства $\frac{\alpha\omega_{pe}^2}{\nu_b^2} < \nu_0$ подкоренное выражение всегда действительно при любых действительных

δ , так как его можно представить в виде $4\nu_b^2(\delta - \Delta_1)(\delta - \Delta_2)$, где Δ_1 и Δ_2 комплексны.

Таким образом, неравенство $\frac{\alpha \omega_{pe}^2}{\nu_b^2} < \nu_0$ - критерий устойчивости, т. е. при

$$\frac{n_{b0}^0}{n_{p0}} < \frac{\nu_b^2 \nu_0}{\omega_{pe}^3} \left[\frac{\lambda}{L} (1 - e^{-(\lambda/L)}) \right]^{-1} \quad (18)$$

пучок неустойчивости не возбуждает. Следует отметить, что в критерий устойчивости входит длина системы и длина свободного пробега электронов пучка.

При $\lambda \gg L$ мы получаем результат, который следует из простых оценочных

соображений. Рассмотрим случай $\nu_0 > \omega_{pe} \left(\frac{n_{b0}^0}{n_{0p}} \right)^{1/2}$ и учтем столкновения

пучка с нейтральными частицами ν_b . Тогда, учитывая, что при

$\nu_0 > \omega_{pe} \left(\frac{n_{b0}^0}{n_{0p}} \right)^{1/3}$ инкремент $\gamma \sim \omega_{pe} \left(\frac{n_{b0}^0 \omega_{pe}}{n_{0p} \nu_0} \right)^{1/2}$, получим, что система

устойчива при $\nu_e > \gamma$. Это совпадает с результатом (18). Такие оценки справедливы лишь в случае $\lambda \gg L$. Следует, однако, отметить, что

неустойчивость будет приводить к нагреву только в том случае, если

$\omega_{pe} \left(\frac{n_{b0}^0}{n_0} \right)^{1/3} > \nu_0$ [17]. При выполнении же критерия (18) разряд в системе не

должен загораться вообще.

Для нагрева электронов плазмы очень важен вопрос о передаче энергии от плазменных волн к электронам плазмы. Проблема состоит здесь в том, что фазовые скорости волн сравнимы со скоростью пучка и, следовательно, много больше тепловой скорости электронов плазмы. Несмотря на большое количество теоретических работ, посвященных коллапсу ленгмюровских волн, модуляционной неустойчивости их и т. п. [18], этот вопрос остается пока открытым и экспериментальный факт сильного нагрева электронов плазмы [8] не нашел пока последовательного объяснения. Можно лишь утверждать, что экспериментально надежно установлен факт взаимосвязи неустойчивости с нагревом. В этом отношении весьма важна теоретическая проблема диссипации ленгмюровских волн большой амплитуды в плазме.

Пространственное разделение элементов.

В последние годы большой интерес вызывают работы, связанные с использованием плазмы, вращающейся в скрещенных полях, для разделения изотопов [19]. Установки, в которых производились опыты, представляют собой системы типа «Гомополяр», которыми усиленно

занимались в конце 50-х - начале 60-х годов для целей термоядерного синтеза. Позднее в ряде работ было предложено использовать устройства такого типа для разделения изотопов. Система представляет собой в простейшем случае металлический цилиндр с центральным электродом по всей длине цилиндра, помещенный в продольное магнитное поле пробочной конфигурации. При приложении разности потенциалов между центром и периферией системы плазма, образующаяся в результате разряда в скрещенных E - и H - полях, начинает вращаться. Это вращение может быть использовано для разделения изотопов, и, как было показано в последних экспериментах, результаты могут представлять интерес для приложений [19]. Системы, в которых проводились эксперименты, как правило, были импульсными. Если создать стационарную систему и впускать с одного торца какое-либо химическое соединение в газообразной фазе, то в принципе можно провести реакцию диссоциации и разделить в пространстве элементы, образовавшиеся в результате диссоциации электронным ударом. Чтобы выяснить максимальную концентрацию частиц, характерные поля и размеры системы, рассмотрим физические механизмы, лежащие в основе процесса разделения. Пусть полностью ионизованная плазма с плотностью электронов n_e помещена в магнитное поле напряженностью H_0 направленное по оси z , и электрическое поле напряженностью E_0 , направленное вдоль оси r . Ионы плазмы имеют примерную плотность, равную плотности электронов. Концентрация ионов, имеющих массу M_1 равна n_1 , а концентрация ионов с массой M_2 - соответственно n_2 . Будем считать для простоты, что заряды ионов одинаковы и равны единице. Магнитное поле будем считать настолько большим, что ионы замагничены, т. е. частота столкновений ионов между собой много меньше ионной циклотронной частоты ω_{Hi} . Определим теперь характер движения частиц во внешних полях. Пренебрегая в нулевом приближении столкновениями, получим из уравнений движения, что электроны и ионы обоих сортов движутся по азимуту с одной и той же скоростью

$$V_\varphi = \frac{c}{H_0} E_0. \quad (19)$$

Двигаясь по азимуту, частицы испытывают действие центробежной силы, в результате чего возникает центробежный дрейф. Скорость такого дрейфа может быть легко найдена при помощи хорошо известной формулы для дрейфа частицы в магнитном поле под влиянием внешней силы [15]:

$$V = \frac{c[F H_0]}{e H_0^2}, \quad (20)$$

где F – внешняя сила, а e - заряд частицы. Для центробежного дрейфа ионов такой силой будет

$$F_{1,2} = + \frac{M_{1,2} V_\varphi^2}{R} \cdot e_r = + \frac{M_{1,2}}{R} \left(\frac{c E_0}{H_0} \right)^2 \cdot e_r,$$

где R - радиус, на котором находится частица, а e_r – единичный вектор, направленный вдоль радиуса. Влиянием центробежной силы на движение электронов в силу малости их массы можно пока пренебречь. Под действием центробежной силы ионы разных сортов будут иметь различные скорости вдоль азимута:

$$V_{\varphi_{1,2}} = \frac{c E_0}{H_0} - M_{1,2} \cdot \frac{\left(\frac{c E_0}{H_0}\right)^2}{R} \cdot \frac{c}{e H_0}. \quad (21)$$

Отсюда следует, что ионы начнут сталкиваться между собой и возникнет дополнительная сила в азимутальном направлении, действующая на более легкие частицы сорта 1 в направлении, обратном основному дрейфу

$$F_{\varphi_1} = -\left\langle V_{1,2}^{OTH} \sigma_{1,2} \right\rangle \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \cdot n_2 \cdot \frac{c}{e H_0} \frac{(M_2 - M_1)}{R} \left(\frac{c}{H_0} E_0 \right)^2.$$

На ионы сорта 2 будет действовать сила

$$F_{\varphi_2} = \left\langle V_{1,2}^{OTH} \sigma_{1,2} \right\rangle n_1 \cdot \frac{c(M_2 - M_1)}{H_0 e R} \left(\frac{c}{H_0} E_0 \right)^2 \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}.$$

Эти силы приведут к тому, что более легкие ионы массы M_1 будут двигаться к центру, в то время как ионы массы M_2 будут смещаться к периферии, Оба потока будут одинаковы и равны

$$(j_{1,2}) = \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)} \left\langle \sigma_{1,2} V_{1,2} \right\rangle \cdot n_1 n_2 \cdot \frac{c}{H_0^2} \cdot \frac{\left(\frac{c}{H_0} E_0\right)^2}{e^2 R} \cdot (M_2 - M_1). \quad (22)$$

Электронная концентрация в течение всего этого процесса будет оставаться постоянной, если относительная разница масс ионов $M_1 - M_2 / M_1 + M_2$ не слишком мала. В противном случае потоки, определяемые выражением (22), будут малы и может случиться так, что движение плазмы как целого к периферии окажется более существенным, чем эффект разделения. Чтобы найти скорость движения плазмы как целого, обратимся к уравнению движения электронов. В силу квазинейтральности плазмы смещения всех ионов и электронов не могут происходить раздельно. Отметим, что при разделении ионов по массам в каждой точке пространства $n_1 + n_2 = n_e$ т. е. также соблюдается условие квазинейтральности. Частота электрон-ионных столкновений больше частоты ион-ионных примерно в $\sqrt{M/m}$ раз, а центробежные силы, действующие на электрон и ион, относятся как m/M . Учтем влияние центробежного дрейфа ионов и электронных столкновений на движение плазмы как целого, пренебрегая влиянием центробежной силы на электроны. Итак, в силу квазинейтральности и равенства нулю радиального тока радиальные компоненты скоростей электронов и ионов должны быть одинаковы, т. е. $v_{re} = v_{ri1} = v_{ri2}$. Что касается азимутальных

компонент скоростей, то они отличаются друг от друга, согласно формуле (21). Учитывая теперь столкновения электронов с ионами, получим, что электроны дрейфуют в радиальном направлении со скоростью

$$V_{re} = \frac{\langle \sigma_{ei1} v_{OTH} \rangle n_1 (V_{\varphi e} - V_{\varphi 1}) + \langle \sigma_{ei2} v_{OTH} \rangle n_2 (V_{\varphi e} - V_{\varphi r})}{\omega_{He}}.$$

Плотность потока плазмы на стенку равна:

$$j_{re} = \frac{n_e \langle \sigma_{ei} v_{OTH.ei} \rangle \left(\frac{cE_0 / H_0}{R} \right)^2 \frac{c}{H_{0e}} [n_1 M_1 + n_2 M_2]}{\omega_{He}}$$

так, как $\sigma_{ei1} = \sigma_{ei2} = \sigma_{ei}$. Учитывая, что $\sigma_{ei} \sim \sigma_{1,2}$ и

$$\langle \sigma_{ei} v_{ei}^{OTH} \rangle \propto \sqrt{\frac{M_1}{m}} \langle v_{1,2}^{OTH} \sigma_{1,2} \rangle,$$

получим при $M \approx M_1 \approx M_2$; $\Delta M = M_2 - M_1$; $n_1 \cong n_2$

$$\frac{j_e}{|j_{1,2}|} \propto \frac{(m/M_1)^{1/2} M}{\Delta M}$$

Таким образом, разделение ионов по массам успеет произойти в том случае, если

$$\frac{\Delta M}{M} \gg \sqrt{\frac{m}{M}}. \quad (23)$$

Сепарация ионов будет происходить до тех пор, пока центробежная сила, действующая на единицу объёма $\frac{M_{1,2}}{R} \left(\frac{cE}{H_0} \right)^2$, не уравновесится градиентом давления nT_i/R .

Чтобы процесс был эффективен, необходимо иметь достаточно большие внешние электрические поля, удовлетворяющие следующему неравенству:

$$\left(\frac{cE_0}{H_0} \right)^2 > \frac{T_i}{M_1}. \quad (24)$$

В обратном предельном случае разделение по массам, как это показано в работе [20], будет отсутствовать. При этом будет происходить разделение по кратности ионизации, как это имеет место в «Токамаке», когда примеси с большими значениями z концентрируются в центре камеры [20].

Эксперименты, проведенные в ряде лабораторий, показали возможность эффективного разделения изотопов в импульсных системах [19]. При проведении химической реакции диссоциации в стационарных условиях с инъекцией газа вдоль магнитного поля необходимо добиться значительной ионизации, для чего необходимы большие мощности. Кроме того, система

должна быть выбрана достаточно длинной, чтобы за время пролета газом установки длиной $Lt \sim (L/u_n)$ разделение успело произойти. Неустойчивости неоднородной плазмы с противоположно направленными градиентами концентрации ионов разных масс также требуют специального изучения, так как они могут уменьшить коэффициент разделения. Очень важна в этом отношении дрейфово-циклотронная неустойчивость. Интересна также проблема разряда в скрещенных полях при малой плотности, которая в настоящее время изучена недостаточно.

Заключение

Помимо чисто плазменных эффектов, рассмотренных в предыдущих разделах для изучения физики химически активной плазмы, необходимо проводить исследования по элементарным процессам, происходящим с участием электронов, таким, как диссоциация возбужденных и невозбужденных молекул электронным ударом, взаимодействие возбужденных молекул и атомов между собой, взаимодействие нейтральных частиц с ионами и т. д. Все эти проблемы, как чисто плазменные, так и связанные с элементарными процессами, представляющие большой научный интерес, весьма важны в прикладном отношении, так как их решение позволит получать более легкими и удобными методами не только обычные химические вещества, но и, возможно, совершенно новые химические соединения. Использование коллективных процессов в плазме для селективного нагрева электронов, а также применения плазмы для разделения продуктов реакций - один из наиболее эффективных методов решения задач современной химии.

Литература

1. Ф. Мак-Таггарт. Плазмохимические реакции в электрических разрядах. М., Атомиздат, 1972.
2. Сб. «Использование плазмы в химических процессах» под ред. Л. С. Полака. «Мир», 1970, стр. 232.
3. Д. А. Франк-Каменецкий. Лекции по физике плазмы. М.т Атомиздат, 1968, стр. 63.
4. Д. А. Франк-Каменецкнн. Кинетика химических реакций. М., Наука, 1967.
5. L. C. Brown, A. T. Bell. Report on the I International Conference on plasma chemistry. Kiev, 1973.
6. Б. М. Смирнов. Физика слабоионизованного газа. М., «Наука», 1972.
7. Ch. Michner, M. Kruger, Partially Ionized Gases. Wiley, 1973.
8. Л. П. Закатов, А. Г. Плахов, Д. Д. Рютов, В. В. Шапкин. ЖЭТФ, 54, 4, 1968.

9. Е. А. Корнилов, О. Ф. Ковник, Я. Б. Файнберг, Л. И. Болотин, И. Ф. Карченко. В сб. «Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой». Киев, «Наукова думка», 1965, стр. 36; ЖТФ, 36, 1064, 1966.
10. М. В. Незлин. ЖЭТФ, 41, 1015, 1961.
11. Л. П. Закатов, А. Г. Плахов. ЖЭТФ, 60, 588, 1971.
12. С. Е. Куприянов. Химия высоких энергий. 6, 1972.
13. М. Ю. Бредихин, А. И. Маслов, Е. И. Скибенко, В. Б. Юферов. ЖТФ, 13, вып. 3, 1973; М. Ю. Бредихин, А. И. Маслов, А. И. Скибенко, Е. И. Скибенко, И. П. Фомин, В. Б. Юферов, ЖТФ, X IV, вып. 1, 1974.
14. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. Квантовая механика. Физматгиз, 1963.
15. К. С. Клоповский. Диссертация, МГУ, 1972.
16. А. А. Введенков, Е. П. Велихов, Р. З. Сагдеев. Успехи физ. наук, 73, 701, 1961.
17. А. А. Иванов, В. Б. Параил, Т. К. Соболева. ЖЭТФ, 63, 1678, 1972.
18. В. Е. Захаров, А. Ф. Мастрюков, В. С. Сынах. Письма в ЖЭТФ, 20, вып. 1, стр. 7-10.
19. V. Bonnevier. Plasma Phys., 13, 763-774, 1971; V. Lehnert. Rotating Plasma. Nuclear Fusion, 11, 485-533, 1971; V. W. James, S. W. Simpson. Phys. Letters, 46A, 1974.
20. С. И. Брагинский. В кн. «Вопросы теории плазмы» под ред. М. А. Леонтовича, 1, Госатомиздат, 1963.

ВЛИЯНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ПРОВОДИМОСТЬ В СПД (СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ).

А.А. Иванов, А.А. Иванов мл., М. Бакал.

Plasma Phys. Control. Fusion. 2002, V. 44, N. 1463-1470.

В статье рассматривается функционирование СПД и возникающий в этих системах ток, поперечный к магнитному полю. Вопросы поперечной проводимости и связанные с ними процессы рассматриваются в рамках хорошо известной модели Морозова, при этом добавлен механизм рекомбинации на стенках движка и дальнейшая объемная ионизация нейтралов, созданных на стенках. Получены функции распределения нейтралов и вторичных электронов, появившихся благодаря ионизации, а также выражение для подсчета поперечного тока. Найденный результат, по сравнению с обычным уравнением Морозова, включает в себя дополнительный коэффициент, позволяющий значительно улучшить количественное согласие теоретического и экспериментального значений для тока.

I. Введение.

Понятие пристеночной проводимости было предложено Морозовым в 1968 [1] для того, чтобы объяснить проводимость бесстолкновительной плазмы поперек магнитного поля в СПД. В той же самой работе Морозов отметил, что проводимость может быть обусловлена присутствием плазменных шумов, однако, основное внимание он уделил пристеночной проводимости, возникающей благодаря столкновениям электронов со стенками. Проблема является более общей, чем просто СПД, поскольку она относится ко всем плазменным системам с изолирующими стенками, перпендикулярными магнитному полю, и с электрическим полем, приложенным параллельно стенке. Как правило, в этих системах концентрация плазмы и нейтралов достаточно низка для того, чтобы средний путь пробега электрона был гораздо больше, чем расстояние между стенками. Таким образом, плазма может рассматриваться как бесстолкновительная. Учитывая столкновения электронов со стенками, Морозов разработал новый подход к вычислению пристеночной проводимости электронного тока [1]. Метод состоит в использовании интегралов движения электронов в бесстолкновительном приближении. Таким образом, можно найти закон изменения в пространстве и времени функции распределения электронов по скоростям, а затем приложить к нему граничные условия, а именно, функцию распределения электронов на стенке, которая была выбрана максвелловской с определенной температурой. Морозов предположил [1], что температуры испускаемых

со стенки электронов отличаются от температуры плазменных электронов. Сравнение с экспериментом привело к необходимости введения не максвелловской начальной функции распределения электронов [2] и к возможности вторичной электронной эмиссии с изолирующей стенки [3]. Мы предлагаем рассмотреть новый дополнительный механизм в рамках исходной модели. Несмотря на экспериментальную проверку модели пристеночной проводимости [4], Морозов говорит о том, что задача о пристеночных процессах остается главной проблемой, стоящей на пути улучшения эффективности СПД, увеличения его срока службы и понижения уровня шумов [5].

Настоящая работа посвящена процессам ионизации и рекомбинации в пристеночной области плазмы, а также их влиянию на электронный ток в СПД. Эти процессы были использованы, в частности, для оценки ионного тока в системах с сильным магнитным полем, когда как ионы, так и электроны замагничены [6,7]. Мы будем применять морозовский подход [1], добавив к нему рекомбинацию ионов и электронов на стенке, а также объемную ионизацию нейтралов, эмитированных стенкой. Важно принять во внимание вопрос определения температуры нейтралов, покидающих стенку. Возможны два предельных случая: температура эмитированных нейтралов либо порядка температуры стенки, либо же они обладают энергией, выделившейся при электрон-ионной рекомбинации, т.е. порядка потенциала ионизации [8].

Предположим, что плазма движется к стенке вдоль магнитных линий, представляя собой бесстолкновительную жидкость, перемещающуюся со скоростью, приблизительно равной ионной акустической. В действительности мы фактически имеем дело с расширением плазмы в вакуум, поскольку плазма исчезает на стенке благодаря мгновенной рекомбинации. Этот процесс происходит на расстоянии, сравнимом с дебаевским радиусом, который гораздо меньше расстояния ионизации λ_i :

$$\lambda_i = \frac{1}{n_e \langle \sigma V_e \rangle} V_n \quad (1)$$

Здесь n_e - концентрация плазмы, $\langle \sigma V_e \rangle$ - коэффициент ионизации, V_n - тепловая скорость нейтралов, покидающих стенку. Оценим пробег ионизации для типичных параметров СПД при использовании ксенона в качестве рабочего газа: $n_e \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $\langle \sigma V_e \rangle \approx 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ при температуре электронов в диапазоне от 10 до 50 эВ.

(а) Если температура нейтралов достаточно низка (и близка к температуре стенки ≈ 0.1 эВ), то пробег ионизации λ_i составляет несколько мм. При тех же параметрах плазмы пробег кулоновских столкновений больше приблизительно в 10^3 раз. Таким образом, пробег ионизации сравним с длиной канала, а электрон-ионными столкновениями можно пренебречь. Наконец, оценим расстояние между столкновениями

электронов и нейтралов. Предполагая, что максимальная концентрация нейтралов составляет 10^{14} см^{-3} , мы получим пробег столкновения электронов с нейтралами равной нескольким десяткам сантиметров, и лишь при плотности нейтралов в 10^{15} см^{-3} , мы бы получили расстояние, сравнимое с шириной канала. Эти оценки показывают, что самое короткое расстояние взаимодействия – это пробег ионизации, и именно его нужно учитывать в дальнейших рассуждениях. Само собой разумеется, что дебаевский радиус, составляющий порядка $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, гораздо короче пробега ионизации. Похожие оценки пробега ионизации были сделаны Бугровой и др [9], но авторы сравнивали его с продольным размером слоев ионизации и ускорения, которые короче длины канала. В работе [9] необходимым требованием была малость пробега ионизации по сравнению с продольными размерами этих слоев. Отметим, что длина канала в СПД в 2 или 3 раза больше, чем его ширина. Это означает, что необходимым для функционирования СПД условием, согласно Бугровой и др. [9], является требование того, чтобы пробег ионизации был меньше или сравним с шириной канала.

Открытым вопросом является плотность нейтралов вблизи стенки. В стационарном состоянии поток плазмы на стенку и обратный поток нейтралов со стенки должны уравниваться. Это позволяет нам получить оценку сверху для пристеночной концентрации нейтралов n_{n0} :

$$n_{n0} V_n = n_e c_s, \quad n_{n0} = \sqrt{\frac{T_e}{T_w}} n_e \quad (2)$$

Здесь T_w - температура стенки, T_e - электронная температура, c_s - ионнозвуковая скорость, M - масса ионов. Эта оценка приводит к хорошо известному результату, когда концентрация нейтралов приблизительно на порядок превышает концентрацию плазмы.

(б) Если температура нейтралов высока (сравнима с энергией ионизации), то согласно уравнению (1) пробег ионизации увеличивается приблизительно в 10 раз и превышает ширину канала. В этом случае процессами ионизации можно пренебречь и лишь столкновения электронов со стенками дают свой вклад в поддержание поперечного к магнитному полю тока. На самом же деле, как только длина ионизации превысит ширину канала, концентрация плазмы начнет уменьшаться, поскольку ионизационные процессы будут случаться все реже. Быстрые нейтралы после многочисленных столкновений со стенками приобретут температуру стенок, длина ионизации снизится и мы снова вернемся к случаю нейтралов с низкой температурой.

Целью данной работы является вычисление поперечного электронного тока, обеспечиваемого объемной ионизацией нейтралов, возникших в результате рекомбинационных процессов плазмы на стенке.

Во второй части статьи выводится зависимость функции распределения нейтралов от расстояния до стенки, что позволяет вычислить изменение концентрации нейтральных частиц в пространстве.

В части третьей с помощью морозовского подхода вычисляется функция распределения электронов, возникших в результате ионизации эмитированных со стенки нейтралов. На ее основе получено уравнение для расчета поперечного электронного тока.

В последней четвертой части полученные результаты сравниваются с более ранними работами, в которых влиянием ионизационных процессов на поперечный перенос электронов пренебрегают.

II. Функция распределения нейтральных атомов.

Введем систему координат, традиционно используемую в СПД, а именно: ось x начинается на внешней стенке и направлена вдоль магнитного поля, т.е. поперек канала, а ось z идет вдоль приложенного электрического поля, т.е. вдоль канала (см. рис. 1). Поскольку характерные размеры рассматриваемых процессов гораздо меньше радиуса СПД, мы выбираем прямоугольную систему координат. Изучим вопрос ионизации в объеме плазмы потока нейтралов, идущих со стенки. У плазменных электронов энергия в 2-3 раза превышает потенциал ионизации, так что они способны ионизовать нейтральные атомы. Вторичные электроны, родившиеся во время ионизации, обладают энергией в несколько эВ [10].

Количество возникающих вторичных электронов и ионов связано с концентрацией нейтральных атомов в месте ионизации. В связи с отсутствием столкновений нейтралы движутся от стенки по прямой до самой точки ионизации. Уравнение, описывающее эволюцию количества нейтралов, можно представить в следующей форме:

$$\frac{dN_n}{dt} = -N_n n_e \langle \sigma V_e \rangle = -\nu_i N_n \quad (3)$$

где ν_i - частота ионизации, зависящая от функции распределения электронов и эффективного сечения ионизации, N_n - количество нейтралов. Поскольку скорость нейтралов остается постоянной вплоть до ионизации, мы получаем в одномерном приближении и в квазистационарном состоянии следующее уравнение:

$$V_{0n} \frac{dN_n}{dx} = -N_n n_e \langle \sigma V_e \rangle \quad (4)$$

Следовательно, длина ионизации:

$$\lambda_i = \frac{V_{0n}}{n_e \langle \sigma V_e \rangle} \sim \frac{V_{0n}}{V_{Te}} \frac{1}{n_e \sigma} \approx \frac{1}{n_e \sigma}, \quad (5)$$

поскольку скорость нейтральных частиц гораздо меньше тепловой скорости электронов V_{Te} . Наши оценки в части I показывают, что ионизация происходит на достаточно коротких расстояниях (меньших, чем ширина канала). С другой стороны, концентрации плазмы и нейтралов

достаточно малы для того, чтобы пренебречь влиянием столкновений вдоль траекторий нейтральных частиц.

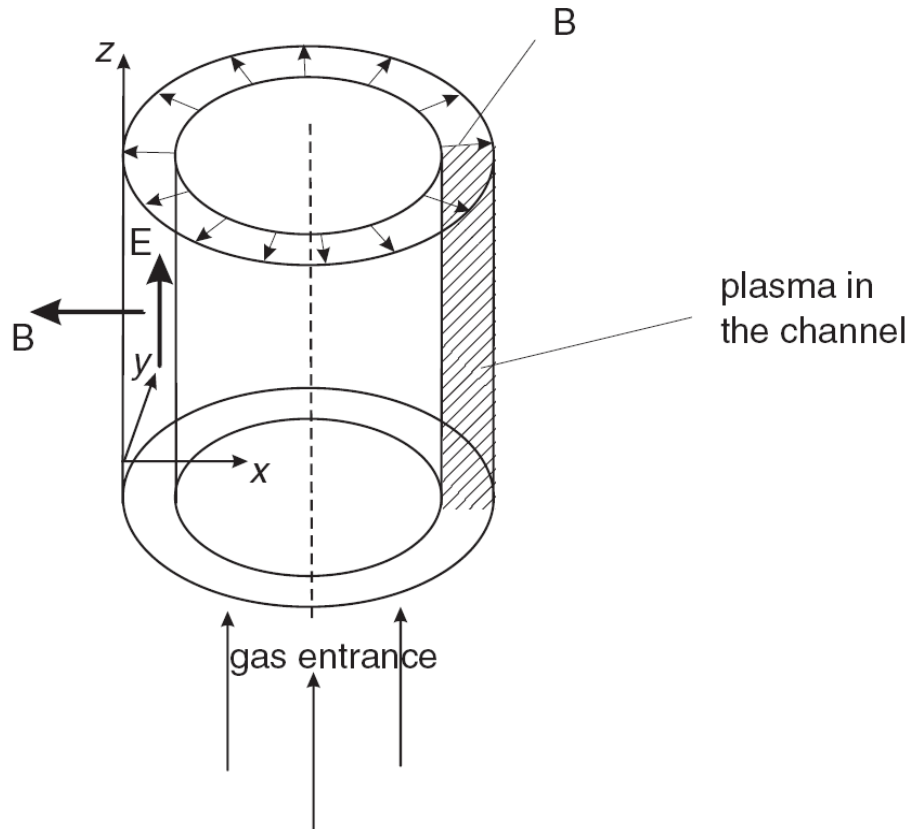


Рис. 1. Схематическое представление СПД, вводимая система координат.

Теперь рассмотрим функцию распределения нейтралов в стационарном случае постоянного потока нейтралов со стенки. При этом в кинетическом уравнении для функции распределения

$$\frac{\partial f_n}{\partial t} + \mathbf{V}_n \frac{\partial f_n}{\partial \mathbf{r}} = -\nu_i f_n \quad (6)$$

можно опустить производную по времени и получить решение, которое на стенке переходит в максвелловское распределение:

$$\mathbf{V}_n \frac{\partial f_n}{\partial \mathbf{r}} = -\nu_i f_n \quad (7)$$

Решение этого, вообще говоря, трехмерного уравнения, можно найти двумя способами. Первый из них основан на гипотезе, что пробег ионизации мал по сравнению с характерными размерами стенки. Следовательно, функция распределения зависит только от координаты x , которая перпендикулярна к стенке. В этом случае формула (7) становится одномерной:

$$V_{nx} \frac{\partial f_n}{\partial x} = -\nu_i f_n, \quad (8)$$

и ее решение описывается следующей функцией:

$$f_n \sim \exp(-v_i \frac{x}{V_{nx}}) \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{3/2} n_{n0} \exp(-\frac{M}{2T_n} (V_{nx}^2 + V_{ny}^2 + V_{nz}^2)) \quad (9)$$

Здесь T_N - температура нейтралов, близкая к температуре стенок. Вторым подход заключается в рассмотрении движения нейтралов вдоль их характеристик в произвольных направлениях. Нейтральные частицы не теряют ни импульса, ни энергии, и вероятность их присутствия на заданной траектории экспоненциально убывает со временем. Следовательно, можно произвольным образом выбрать точку P , расположенную на расстоянии x от поверхности, и найти в ней функцию распределения (см. рис. 2). Частицы достигают этой точки по прямым, т.е. из точек A и B на стенке.

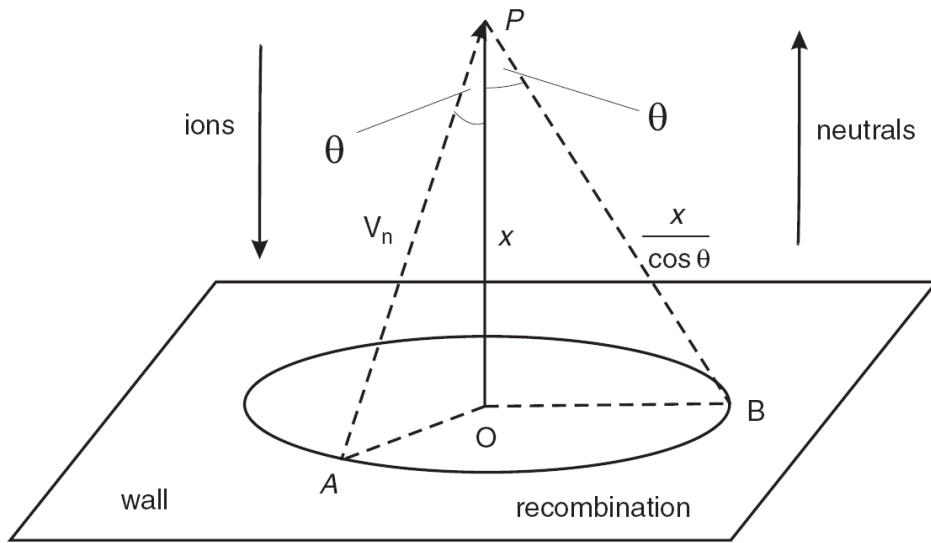


Рис. 2. Схема расчета плотности нейтралов в точке P .

Функция распределения вдоль этих прямых экспоненциально уменьшается, следовательно, для заданного абсолютного значения скорости нейтралов $|\mathbf{V}_n|$ мы получаем:

$$f_n(P) \sim \exp(-v_i \frac{x}{\cos \theta} \frac{1}{|\mathbf{V}_n|}) \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{3/2} n_{n0} \exp(-\frac{M}{2T_n} |\mathbf{V}_n|^2 (V_{nx}^2 + V_{ny}^2 + V_{nz}^2))$$

Действительно, частица прошла путь $\frac{x}{\cos \theta}$, а ее скорость - $|\mathbf{V}_n|$. С другой стороны, поскольку $|\mathbf{V}_n| \cos \theta = |V_{nx}|$, мы приходим к тому же результату, что и функция (9).

Теперь мы знаем функцию распределения нейтралов. В следующей части статьи мы получим функцию распределения электронов, возникших благодаря ионизации.

III. Функция распределения электронов

Уравнение Власова для электронов имеет стандартную форму:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \mathbf{V}_e \frac{\partial f_e}{\partial \mathbf{r}} - \frac{e}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{V}_e \times \mathbf{H} \right) \frac{\partial f_e}{\partial \mathbf{V}_e} = 0 \quad (10)$$

Как известно, функция распределения остается постоянной на характеристиках, которые определяются из уравнений движения электронов. В нашем случае постоянных скрещенных электрического и магнитного полей, решением будет движение с постоянной скоростью $c \frac{E}{H}$ вдоль оси y с циклотронным вращением вокруг магнитных силовых линий. Что касается движения электронов вдоль магнитного поля, оно также происходит с постоянной скоростью, на этот раз вдоль оси x . Иными словами,

$$\begin{aligned} V_{ez} &= V_{\perp} \sin(\omega_{He} t + \alpha) \\ V_{ey} &= V_{\perp} \cos(\omega_{He} t + \alpha) + c \frac{E}{H} \\ V_{ex} &= V_{\square} \end{aligned} \quad (11)$$

Установим соотношение между тремя константами в уравнениях (11) и функцией распределения на стенке. В момент времени $t=0$ (соответствующий ионизации) компоненты скорости электрона - V_{ex}^0 , V_{ey}^0 , V_{ez}^0 . С другой стороны, из уравнения (11) мы получаем, что эти скорости равны, соответственно, V_{\square} , $V_{\perp} \cos \alpha + c \frac{E}{H}$ и $V_{\perp} \sin \alpha$. Другими словами,

$$\begin{aligned} V_{ex} &= V_{\square} = V_{ex}^0 \\ V_{ey} &= V_{\perp} \cos(\omega_{He} t + \alpha) + c \frac{E}{H} = (V_{ey}^0 - c \frac{E}{H}) \cos(\omega_{He} t) - V_{ez}^0 \sin(\omega_{He} t) + c \frac{E}{H} \\ V_{ez} &= V_{\perp} \sin(\omega_{He} t + \alpha) = (V_{ey}^0 - c \frac{E}{H}) \sin(\omega_{He} t) + V_{ez}^0 \cos(\omega_{He} t) \end{aligned} \quad (12)$$

В системе уравнений (12) составляющие скорости, зависящие от времени, выражены через начальную скорость электрона, возникшего в результате ионизации. Предположим для простоты, что начальная функция распределения электронов является максвелловской, с некоторой $T_e^* \sim T_e \square T_w \sim T_n$. Что касается скорости рождения вторичных электронов, то она пропорциональна скорости уменьшения концентрации нейтралов. Найдем более точное выражение для скорости рождения электронов. Чтобы определить нужные нам коэффициенты, воспользуемся тем, что они определяются произведением вероятностей того, что нейтральный атом достигнет точки x_0 , и вероятности его последующей ионизации на интервале dx_0 . Первая вероятность составляет $\exp(-v_i \frac{x_0}{V_{nx}})$, а вторая

$\frac{dx_0}{\lambda_i} = \frac{dx_0}{V_{nx}} v_i$. Отметим, что коэффициент $\langle \sigma V_e \rangle$, входящий в скорость ионизации, усреднен по всем электронам плазмы, участвующим в ионизации нейтралов. Следовательно, он не зависит от скорости рождающихся при ионизации электронов. Воспользовавшись функцией распределения нейтралов (9), искомая функция распределения электронов в окрестности точки x_0 имеет следующую форму:

$$df_e = n_{n0} \exp(-v_i \frac{x_0}{V_{nx}}) \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{3/2} \exp(-\frac{MV_n^2}{2T_n}) v_i \frac{dx_0}{V_{nx}} d^3 \mathbf{V}_n \times \\ \times \left(\frac{m}{2\pi T_e^*} \right)^{3/2} \exp(-\frac{m(V_e^0)^2}{2T_e^*}) d^3 \mathbf{V}_e^0 \quad (13)$$

Чтобы найти вклад электронного тока dJ_z , протекающего в слое толщины dx_0 , расположенном вблизи точки x_0 , необходимо умножить df_e на $-e$ и V_{ez} из уравнения (12). Интегрирование по компонентам нейтралов вдоль осей z и y , а также по родившимся электронам дает

$$dJ_z = en_{n0} v_i dx_0 2 \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{1/2} \int_0^\infty \frac{dV_{nx}}{V_{nx}} \exp(-\frac{MV_{nx}^2}{2T_n} - v_i \frac{x_0}{V_{nx}}) c \frac{E}{H} \times \\ \times \left(\frac{m}{2\pi T_e^*} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^\infty dV_{ex}^0 \sin(\omega_{He} t) \exp(-\frac{m(V_{ex}^0)^2}{2T_e^*}) \quad (14)$$

В связи с тем, что электрон движется вдоль магнитного поля с постоянной скоростью V_{ex}^0 , время в системе уравнений (12) можно заменить на $t = \left| \frac{x - x_0}{V_{ex}^0} \right|$. Отметим, что величина $|x - x_0|$ имеет тот же порядок, что и ларморовский электронный радиус, иначе говоря, это расстояние гораздо меньше пробега ионизации благодаря тому, что в интеграле по электронам время t измеряется в ω_{He}^{-1} . Таким образом, мы получаем

$$dJ_z = en_{n0} c \frac{E}{H} v_i dx_0 2 \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{1/2} \int_0^\infty \frac{dV_{nx}}{V_{nx}} \exp(-\frac{MV_{nx}^2}{2T_n} - v_i \frac{x_0}{V_{nx}}) \times \\ \times \left(\frac{m}{2\pi T_e^*} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^\infty dV_{ex}^0 \sin \left(\omega_{He} \left| \frac{x - x_0}{V_{ex}^0} \right| \right) \exp(-\frac{m(V_{ex}^0)^2}{2T_e^*}) \quad (15)$$

Чтобы вывести выражение для полного тока, нужно проинтегрировать dJ_z по x и умножить на $2\pi R$, где R - средний радиус канала.

$$I_z = 2\pi R en_{n0} c \frac{E}{H} v_i 2 \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{1/2} \int_0^L dx_0 \int_0^\infty \frac{dV_{nx}}{V_{nx}} \exp(-\frac{MV_{nx}^2}{2T_n} - v_i \frac{x_0}{V_{nx}}) \times$$

$$\times \left(\frac{m}{2\pi T_e^*} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} dV_{ex}^0 \exp\left(-\frac{m(V_{ex}^0)^2}{2T_e^*}\right) \int_0^L dx \sin\left(\omega_{He} \left| \frac{x-x_0}{V_{ex}^0} \right| \right) \quad (16)$$

Интеграл по x :

$$\int_0^L dx \sin\left(\omega_{He} \left| \frac{x-x_0}{V_{ex}^0} \right| \right) = \frac{|V_{ex}^0|}{\omega_{He}} \left(2 - \cos\left(\frac{x_0}{V_{ex}^0} \omega_{He}\right) - \cos\left(\frac{L-x_0}{V_{ex}^0} \omega_{He}\right) \right)$$

Косинусы – быстро осциллирующие функции при $V_{ex}^0 \rightarrow 0$, так что их вкладом в интеграл по скоростям электронов

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} dV_{ex}^0 \exp\left(-\frac{m(V_{ex}^0)^2}{2T_e^*}\right) \frac{|V_{ex}^0|}{\omega_{He}} \left(2 - \cos\left(\frac{x_0}{V_{ex}^0} \omega_{He}\right) - \cos\left(\frac{L-x_0}{V_{ex}^0} \omega_{He}\right) \right) \approx \\ \approx \int_{-\infty}^{\infty} dV_{ex}^0 \exp\left(-\frac{m(V_{ex}^0)^2}{2T_e^*}\right) \frac{|V_{ex}^0|}{\omega_{He}} 2 = \frac{4T_e^*}{m\omega_{He}} \end{aligned}$$

можно пренебречь, в результате чего оценка для интеграла (16) становится (с учетом того, что $\rho_L \ll x_0 \ll \lambda_i \ll L$)

$$\begin{aligned} I_z &= 2\pi R e n_{n0} c \frac{E}{H} \frac{v_i}{\omega_{He}} 2 \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{1/2} \int_0^L dx_0 \int_0^{\infty} \frac{dV_{nx}}{V_{nx}} \exp\left(-\frac{MV_{nx}^2}{2T_n} - v_i \frac{x_0}{V_{nx}}\right) \left(\frac{8T_e^*}{\pi m} \right)^{1/2} \approx \\ &\approx 2\pi R e n_{n0} c \frac{E}{H} \frac{1}{\omega_{He}} 2 \left(\frac{M}{2\pi T_n} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} dV_{nx} \exp\left(-\frac{MV_{nx}^2}{2T_n}\right) \int_0^{\infty} \frac{v_i dx_0}{V_{nx}} \exp\left(-v_i \frac{x_0}{V_{nx}}\right) \left(\frac{8T_e^*}{\pi m} \right)^{1/2} = \\ &= 4\pi R e n_{n0} c \frac{E}{H} \frac{1}{\omega_{He}} \left(\frac{2T_e^*}{\pi m} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

или

$$I_z \approx 4\sqrt{\pi} R n_{n0} e c \frac{E}{H} \left(\frac{2T_e^*}{m} \right)^{1/2} \frac{1}{\omega_{He}} \quad (17)$$

IV. Обсуждение.

В части I мы получили оценку максимальной концентрации нейтралов n_{n0} вблизи стенки канала (см. формулу (2)). Подставив эту оценку в формулу (17), мы приходим к следующему выражению для поперечного тока:

$$I_z = 2\pi R \frac{n_e e c}{\sqrt{\pi}} \frac{E}{H} \left(\frac{2T_e^*}{m} \right)^{1/2} \frac{1}{\omega_{He}} 2 \left(\frac{T_e^*}{T_N} \right)^{1/2} \quad (18)$$

По сравнению с классическим результатом [1] в правой части этой формулы присутствует дополнительный фактор $2\left(\frac{T_e^*}{T_N}\right)^{1/2}$. Удвоение

появилось благодаря тому, что после ионизации электроны расходятся с равной вероятностью по всем направлениям, в то время как в исходной морозовской модели они уходят со стенки лишь в полупространство. Оценим количественно этот новый коэффициент. Так как температура электронов T_e^* , полученных в результате ионизации, сравнима по порядку величины с температурой электронов в объеме плазмы T_e , а температура нейтральных атомов T_N порядка температуры стенки T_w (согласно рассуждениям, приведенным в части I), то этот коэффициент - порядка 10.

Сравним полученный результат с экспериментальными данными. Если теория пристеночной проводимости верна, то токи в СПД разных размеров должны быть пропорциональны среднему радиусу канала при условии того, что плазма имеет те же параметры. К сожалению, систематические измерения в этом плане отсутствуют, так что невозможно сравнить различные СПД при сохранении параметров плазмы. Поэтому мы ограничимся данными хорошо изученных движков, таких как SPT-50 [11] и SPT-100 [12]. Для SPT-50 ток разряда равен 1А, $D=50mm$, концентрация плазмы $n_e \approx 10^{11} cm^{-3}$, температура электронов – от 10 до 20 эВ, средняя величины электрического поля составляет 100 В/см, а сила магнитное поля равна 300 Гс [11]. По модели пристеночной проводимости [4] вычисленное значение тока составляет несколько десятых Ампера, т.е. на порядок меньше измеренных величин. Оценки для SPT-100 также указывают на отставание теоретического результата по сравнению с экспериментальными значениями приблизительно в 10 раз. Результаты, полученные в нашей статье, дают как раз корректирующий коэффициент порядка 10 к стандартному значению пристеночной проводимости, так что можно считать, что изначальный подход хорошо описывал качественные основные характеристики СПД. А, приняв во внимание рекомбинацию плазмы на стенке с последующей объемной ионизацией нейтралов, можно достичь и лучшего количественного согласия с экспериментом.

Вторым важным выводом, который можно сделать из этой работы, является важность использования в качестве рабочего тела тяжелых газов. Пробег ионизации обратно пропорционален квадратному корню из массы иона, так что для легких газов он может превысить ширину канала (11–15mm). Потенциал ионизации легких газов также выше, чем у тяжелых, оба эти фактора мешают использовать легкие газы в СПД, во всяком случае, в СПД существующих конструкций.

Эта работа выполнена в рамках «Объединения научно-исследовательской деятельности» CNRS/CNES/SNECMA/ONERA N° 2232 (Франция).

Литература.

1. Морозов А.И. ПМТФ, 1968, № 3, с. 19.
2. Морозов А.И., Шубин А.П. Физика плазмы. 1990, т. 16, с. 711.
3. Морозов А.И. Физика плазмы. 1991, 17, с. 393.
4. Бугрова А.И., Морозов А.И., Харчевников В.К., ЖТФ. 1985, т. 55, с. 1072.
5. Morozov A.I. 1995 24th International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, September 19-23, Paper IEPC-95-5.
6. Иванов А.А., Лейман В.Г. Физика плазмы. 1978, № 4, с. 374.
7. Иванов А.А., Тимченко Н.Н. Физика плазмы. 1990, т. 16, с. 863.
8. Janev R K. 2001 Atomic Physics and plasma wall interaction issues in divertor plasma modeling. Atomic and Plasma-Mater. Interaction Data for Fusion, IAEA 9, p. 1.
9. Bugrova A.I, Kim V., Maslennikov N.A. and Morozov A.I. 1991 AIDAA/AIAA/DGLR/JSASS, 22nd Intern. Electric Propulsion Conference, October 14-17, Viareggio, Italy, Paper IEPC-91-079.
10. Inokuti M. 1971 Reviews of Modern Physics, 43, p. 297.
11. Guerrini G., Michaut C., Bacal M., Vesselovzorov A.N. and Pogorelov A. A. 1998, Rev. Sci. Instrum. 6, p. 804.
12. Gascon N. 2000 Thesis of the University of Provence (Aix-Marseille I) «Etude de propulseurs plasmiques à effet Hall pour systèmes spatiaux»/

Список избранных научных трудов.

I. Неустойчивости в плазме. Пучки электронов в плазме. Квазилинейная релаксация. ВЧ электромагнитные поля.

1. А.А. Иванов. «О стабилизации дрейфовой неустойчивости в ловушках с нарастающим к границе магнитным полем». ДАН СССР, 166, вып. 5, с. 1084-1087, 1966.
2. А.А. Иванов, Л.И. Рудаков. «Динамика квазилинейной релаксации бесстолкновительной плазмы». ЖЭТФ, т. 51, вып. 11, с. 1522, 1966.
3. А.А. Иванов, Б.М. Маркеев, Л.И. Рудаков. «О динамике квазилинейной релаксации в неустойчивой неоднородной плазме». ЖЭТФ, т. 52, вып. 2, с. 594, 1967.
4. А.А. Иванов. «О стабилизации дрейфовой неустойчивости изотермической плазмы в ловушке». ЖЭТФ, т. 37, вып. 2, с. 229, 1967.
5. А.А. Иванов, Л.И. Рудаков, И. Тейхманн. «О влиянии высокочастотного магнитного поля на неустойчивость плазмы». ЖЭТФ, т. 53, с. 1690, 1967.
6. А.А. Иванов, Я.Р. Рахимбабаев, В.Д. Русанов. «Диффузия бесстолкновительной калиевой плазмы поперек магнитного поля при дрейфовой неустойчивости». ЖЭТФ, т. 52, с. 594, 1967.
7. А.А. Иванов, Л.И. Рудаков, И. Тейхманн. «Влияние высокочастотного магнитного поля на неустойчивости плазмы». ЖЭТФ, т. 54, вып. 5, с. 1380, 1968.
8. А.А. Иванов, Ю.Б. Казаков, В.Д. Русанов, С.С. Соболев. «О стабилизации высокочастотным магнитным полем потенциальных колебаний плазмы в Q-машине». Письма в ЖЭТФ, т. 9, вып. 6, с. 356, 1969.
9. А.А. Иванов, Л.А. Корозовицкий, В.Д. Русанов. «Распространение тепла в плазме вдоль магнитного поля». ДАН СССР, т. 184, с. 811, 1969.
10. А.А. Иванов, Е.З. Мейлихов, В.В. Параил, Д.А. Франк-Каменецкий. «Возбуждение непотенциальных колебаний в плазме твердого тела». ДАН СССР, т. 187, № 1, с. 68, 1969.

11. А.А. Иванов, Е.З. Мейлихов, В.В. Параил. «Непотенциальные колебания в плазме антимонида индия». ФТП, 3, с. 971, 1969.
12. А.А. Иванов, В.Ф. Муравьев. «Влияние геликона на неустойчивость плазмы». «ЖЭТФ», т. 59, вып. 1(7), с. 254, 1970.
13. А.А. Иванов, М.Д. Спектр, Д.А. Франк-Каменецкий. «Резонансные частицы при электронном циклотронном нагреве плазмы». Письма ЖЭТФ, т. 11, вып. 2, с. 136, 1970.
14. А.А. Иванов, В.П. Гозак, Б.И. Патрушев, Д.А. Франк-Каменецкий. «Низкочастотная неустойчивость электронно-циклотронной волны в плазме». ЖТЭФ, т. 59, вып. 6, с. 1080, 1970.
15. А.А. Иванов, В.Д. Русанов, Р.З. Сагдеев. «Электронные ударные волны в бесстолкновительной плазме». Письма в ЖЭТФ, т. 12, стр. 29, 1970.
16. А.А. Иванов, Л.И. Рудаков. «Мощный релятивистский пучок электронов в плазме». ЖЭТФ, т. 58, вып. 4, с. 1332, 1970.
17. А.А. Иванов, В.В. Параил. «Об уширении монохроматической циклотронной волны большой амплитуды в плазме». ЖЭТФ, т. 60, с. 2113, 1971.
18. А.А. Иванов, В.Ф. Муравьев. «О влиянии высокочастотного магнитного поля на неустойчивость плазмы». ПМТФ, № 2, с. 10, 1971.
19. А.А. Иванов, Я.Н. Истомина, Л.Л. Козоровицкий, В.Д. Русанов. «Бесстолкновительная тепловая волна в плазме». ПМТФ, № 1, с. 51, 1971.
20. А.А. Иванов, В.Ф. Муравьев. «Возбуждение электростатических ионно-циклотронных колебаний поперечным током». ДАН СССР, т. 201, № 3, с. 567, 1971.
21. А.А. Иванов, В.В. Параил, Т.К. Соболева Т.К. «Нелинейная теория взаимодействия моноэнергетического пучка с плотной плазмой». ЖЭТФ, т. 63, с. 1678, 1972.

22. А.А. Иванов, В.В. Параил. «Об одной низкороговой неустойчивости в слабоионизированной плазме». ЖТФ, т. 12, с. 2444, 1972.
23. А.А. Иванов, Т.К. Соболева. «Стабилизация дрейфовых неустойчивостей магнитозвуковой волны». ЖЭТФ, т. 62, с. 2170, 1972.
24. А.А. Иванов, В.В. Параил. «Взаимодействие волны большой амплитуды с частотой $\Omega < \sqrt{\omega_{Hi}\omega_{He}}$ ». ЖЭТФ, т. 62, с. 932, 1972.
25. А.А. Иванов, В.И. Рыжий. «Коллективная релаксация неравновесных фотоэлектронов в квантующих магнитных полях». ЖЭТФ, т. 63, вып. 10, с. 1514, 1972.
26. А.А. Иванов, Л.П. Закатов, А.Г. Плахов, В.В. Шапкин. «Получение релятивистской плазмы адиабатическим сжатием в системе плазма-пучок». Письма в ЖЭТФ, т. 15, в. 1, с. 16, 1972.
27. А.А. Иванов, М.Г. Никулин. «Нелинейное взаимодействие ленгмюровских волн большой амплитуды в бесстолкновительной плазме». ЖЭТФ, т. 65, вып. 7, с. 168, 1973.
28. А.А. Иванов, Ю.С. Сигов, Ю.В. Ходырев. «К нелинейной теории высокочастотного нагрева плазмы». Докл. АН СССР, т. 214, № 6, с. 1291, 1974.
29. А.А. Иванов, Н.С. Путвинская, В.И. Рыжий. «Диссипативная неустойчивость плазмы с изотропным распределением неравновесных электронов в магнитном поле». ЖЭТФ, т. XLV, вып. 5, с. 973, 1975.
30. А.А. Иванов, Т.К. Соболева, П.Н. Юшманов. «Трехмерная квазилинейная релаксация». ЖЭТФ, т. 69, № 6, с. 2023, 1975.
31. А.А. Иванов, Н.С. Путвинская. «Фокусировка мощного пучка релятивистских электронов в плазме». ЖТЭФ, вып. 10, с. 2051, 1975.
32. А.А. Иванов, Т.К. Соболева. «Электронные пучки в плазме». Химия плазмы, вып. 3. М. Атомиздат, с. 240, 1976.
33. А.А. Иванов, А.В. Байтин, К.С. Серебренников. «Параметрическая черенковская неустойчивость релятивистского электронного пучка в периодически

- неоднородной диссипативной среде». Физика плазмы, т. 18, вып. 9, с. 1166, 1992.
34. А.А. Иванов, А.В. Байтин. Применение метода регуляризации бесконечных детерминантов к исследованию параметрических неустойчивостей. Письма в ЖЭТФ, т. 59, вып. 6, с. 389-392, 1994.
35. А.А. Иванов, А.В. Байтин. Модуляционная неустойчивость нижнегибридной волны большой амплитуды. Физика плазмы, т. 21, вып. 9, с. 1056, 1995.

II. Пучково - плазменный разряд (ППР). Химия плазмы, сильнонеравновесная плазма (разделение изотопов, центрифуги).

36. А.А. Иванов, В.В. Параил. «Взаимодействие плазменной струи с химически активной слабоионизированной газовой мишенью». ЖЭТФ, 1974, т. 67, вып. 7, с. 94, 1974.
37. А.А. Иванов, С.М. Крашенников, Т.К. Соболева, П.Н. Юшманов. «Взаимодействие ионных пучков с плазмой». Физика плазмы, т. 1, вып. 5, с. 753, 1975.
38. А.А. Иванов. «Физика химически активной плазмы». Физика плазмы, т. 1, вып. 1, с. 147, 1975.
39. А.А. Иванов. «О роли неустойчивости плазмы в плазмохимии». Химия плазмы, вып. 2, М. Атомиздат, с. 130, 1975.
40. А.А. Иванов, Т.К. Соболева, П.Н. Юшманов. «Перспективы использования и применения плазменно-пучкового разряда в плазмохимии». Физика плазмы, т. 3, вып. 1, с. 152, 1977.
41. А.А. Иванов, А.И. Бабарицкий, В.В. Шапкин. «Плазменные центрифуги». Химия плазмы, вып. 4, Москва, Атомиздат, с. 98, 1977.
42. А.А. Иванов, В.Г. Лейман. «О зажигании пучково-плазменного разряда мощным электронным пучком в газе большой плотности». Физика плазмы, вып. 4, с. 780, 1977.
43. А.А. Иванов, В.Г. Лейман. «О срыве пучково-плазменного разряда в поперечном электрическом поле». Физика плазмы, вып. 4, с. 786, 1977.

44. А.А. Иванов, А.И. Бабарицкий, В.В. Северный, В.В. Шапкин. «Исследование стационарного разряда в скрещенных электромагнитных полях». Физика плазмы, т. 3, вып. 4, с. 894, 1977.
45. А.А. Иванов, А.И. Бабарицкий, В.В. Северный, В.В. Шапкин. «Пучково-плазменный разряд в скрещенных электрическом и магнитных полях». ДАН СССР, т. 237, вып. 1, с. 68, 1977.
46. А.А. Иванов, А.И. Бабарицкий, В.В. Шапкин. «Разделение элементов по массам в стационарной вращающейся плазме». Физика плазмы, вып. 6, с. 1405, 1977.
47. А.А. Иванов, В.А. Никифоров. «Применение плазменно-пучкового разряда в плазмохимии». Химия плазмы, вып. 5, М. Атомиздат. с. 148, 1978.
48. А.А. Иванов, В.Г. Лейман. «Электронные пучки в плазмохимии». Химия плазмы, вып. 5, М. Атомиздат, с. 176, 1978.
49. А.А. Иванов, В.Г. Лейман. Об одном возможном механизме разделения элементов и изотопов в плазме. Физика плазмы, т. 4, вып. 3, с. 176, 1978.
50. А.А. Иванов, О.Н. Азарова, Т.К. Соболева. «Об устойчивости плоских электронных пучков в пространственно-ограниченной плазме». Физика плазмы, т. 5, с. 639, 1979.
51. А.А. Иванов, С.И. Крашенников, В.В. Старых. «Влияние процессов возбуждения на кинетику электронов в плазменно-пучковом разряде». Beitr. Plasmaphys. Band 19, heft 5, 6, s. 377, 1979.
52. А.А. Иванов, В.В. Старых, Р. Винклер, И. Вильгельм. «Сравнение макроскопических свойств электронов в плазме плазменно-пучкового и тлеющего разрядов». Beitr. Plasmaphys. Band 19, heft 5, 6, s. 335, 1979.
53. А.А. Иванов, В.А. Никифоров, Г.Б. Левадный и др. «Исследование реакций диссоциации в неравновесной плазме стационарного плазменно-пучкового разряда». Физика плазмы, т. 5, вып. 3, с. 663, 1979.
54. А.А. Иванов, В.В. Шапкин, К.К. Гадеев, В.В. Северный. «Экспериментальные исследования некоторых

- характеристик пучково-плазменного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях». Физика плазмы, т. 5, вып. 5, 1979 .
55. А.А. Иванов, С.И. Крашенников, В.А. Никифоров, В.В. Шапкин. «Об оптимальных параметрах плазмохимического реактора на основе стационарного плазменно-пучкового разряда». ЖТФ, т. 50, вып. 6, с. 1310, 1980.
 56. А.А. Иванов, Б.И. Хрипунов, В.В. Шапкин. «О влиянии атомов в скрещенных E и H полях». ЖТФ, т. 50, вып. 11, с. 1195, 1980.
 57. А.А. Иванов, Н.Н. Тимченко, Б.И. Хрипунов, В.В. Шапкин. «О влиянии атомов с высоким потенциалом ионизации на разряде в скрещенных E и H полях». ЖТФ, т. 50, вып. 11, с. 2295, 1980.
 58. А.А. Иванов, К.К. Гадеев, В.А. Никифоров. «Релаксация электронного пучка в пучково-плазменном разряде в скрещенных полях». Физика плазмы, вып. 5, с. 1020, 1981.
 59. Иванов А.А., Гадеев К.К., Ерастов Е.М. и др. «Образование объемного пучково-плазменного разряда в скрещенных полях». Доклад АН СССР, 1981, т. 256, № 4, с. 834, 1981.
 60. А.А. Иванов, С.П. Крашенников. «Кинетика электронов и молекул в плазменно-пучковом разряде в молекулярных газах». ЖТФ, т. 51, вып. 11, с. 2271, 1981.
 61. А.А. Иванов. «Неравновесная плазма для химии» Итоги науки и техники. Серия: Физика плазмы. М. ВИНТИ, том 3, с. 176, 1982.
 62. А.А. Иванов, О.Н. Азарова, Г.Б. Левадный. «Влияние поперечных размеров электронного пучка на пучково-плазменную неустойчивость». ДАН СССР, т. 269, с. 93, 1983.
 63. А.А. Иванов, Н.Г. Попков. «О плазменно-пучковой неустойчивости ограниченного электронного пучка в слабом магнитном поле». Физика плазмы, т. 10, вып. 1, с. 106, 1984.

64. А.А. Иванов, О.Н. Азарова, Г.Б. Левадный. «О стабилизации ограниченных электронных пучков в плазме». Физика плазмы, т. 10, вып. 1, с. 115, 1984.
65. А.А. Иванов, Н.Н. Тимченко. «Разделение ионов по массам при противотоке в полностью ионизованной вращающейся плазме». Физика плазмы, том 16, вып. 12, с. 1491, 1990.

III. ЭЦР в плазме. Ионные источники. Плазменные двигатели. Пучково-плазменный разряд. Общая физика. Астрофизика.

66. А.А. Иванов, А.В. Байтин. «Модуляционная неустойчивость нижегибридной волны большой амплитуды». Физика плазмы. Том 21, № 6, с. 507, 1995.
67. А.А. Ivanov, M. Bacal, L.I. Elisarov, and A.V. Sionov. "Self-consistent charged-particle motion in negative-ion plasmas". Phys. Rev. E, v. 52, N 6, p. 6679, 1995.
68. А.А. Ivanov, M. Bacal, F.El. Balghiti-Sube, and A.V. Sionov. "Negative ion Ectraction Physics". Fusion Technology, p. 585, 1996.
69. А.А. Иванов, А.А. Серов, А.В. Байтин, А.Б. Сионов. «О роли сильной турбулентности в высокочастотных разрядах низкого давления в магнитном поле». Письма в ЖЭТФ, том 64, № 9, с. 608, 1996.
70. А.А. Ivanov, M. Bacal, F.El. Balghiti-Sube, and A.V. Sionov. "Recovery of a weakly magnetized negative-ion plasma after photodetachment". Phys. Rev. E, v. 55(1), p. 956, 1997.
71. А.А.Иванов, А.В. Байтин и др. «Об эффективности энергоотдачи электронного пучка в пучково-плазменном разряде». Физика плазмы, том 24, № 12 с. 1, 1998.
72. А.А. Иванов, А.Б. Сионов, К.И. Чуботарю, М.Бакал. «Кинетическая динамика начального возмущения в плазме с отрицательными ионами». Физика плазмы, т. 24, № 11, с. 1033, 1998.
73. А.А. Иванов, А.А. Серов, Л.Н. Князев, С.В. Муравьев. «Об эффективности энергоотдачи электронов в пучково-плазменном разряде». Физика плазмы. Том 25, вып. 1, с. 52, 1999.

74. A.A. Ivanov, V.Yu. Fedotov, A.N. Vesselovsorov, G.Guerrini, M.Bacal. "On the Electron Energy Distribution Function in a Hall-type Thruster". *Physics of Plasmas*, v. 6, 11, p. 4360, 1999.
75. A.A. Ivanov, K.S. Serebrennikov, Fedotov V.Yu., M. Bacal, J.-M Buzzi. "Parametric Instabilities Excited by ECR-Resonance Heating in a Mirror Machine". *Вопросы атомной науки и техники, Maastricht*, № 1, с. 253, 2000.
76. А.А. Иванов, А.А. Серов, Л.Н. Князев, С.В. Муравьев, А.А. Лукьянов, В.Ю. Федотов. «Влияние внешнего ВЧ-поля на пучково-плазменный разряд в магнитном поле». *Физика плазмы*, том 26, № 4, с. 1, 2000.
77. А.А. Иванов, Ю.Р. Аланакян, А.А. Лукьянов, К.С. Серебренников, В.Ю. Федотов. «Многомодовая параметрическая неустойчивость в условиях электронного циклотронного нагрева». *Физика плазмы*, том 26, № 4, с. 1, 2000.
78. A.A. Ivanov, D. Meyer, K.S. Serebrennikov, K. Wiesemann, U. Wolters. "Parametric Instabilities Excited by ECR-Resonance Heating in a Mirror Machine". *Вопросы атомной науки и техники*, № 1, с. 253, 2000.
79. A.A. Ivanov, A.A. Ivanov Jr. and M. Bacal. "Effect of plasma-wall recombination on the conductivity in Hall thrusters". *Plasma Phys. Control. Fusion*, 44, p. 1463, 2002.
80. A.A. Ivanov, D. Meyer, J.M. Buzzi, K. Wiesemann, U. Wolters. "Influence of broadened pump wave spectra on the stochastic heating in an ECR mirror machine". *Europhysics Letters*, 59 (6), p. 841, 2002.
81. А.А. Иванов К.С. Серебренников. «Самосогласованное расширение многокомпонентной плазмы в вакуум». *Письма в ЖЭТФ*, т. 78, вып. 3, с. 154, 2003.
82. А.А. Иванов, А.В. Переславцев, Л.И. Елизаров, Г.В. Поволоцкая. «Восстановление окислов и хлоридов металлов в пучково- плазменном разряде». *Вопросы атомной науки и техники. Плазменная электроника и новые методы ускорения* (3), № 4, с. 213, 2003.
83. A.A. Ivanov, A. A. Lukianov, E. A. Vostrikova. On the Role of low Turbulence in an ECR Source of multi Charge Ions. In.:Proc. International Conference "MODE CONVERSION,

COHERENT STRUCTURES AND TURBULENCE"
Moscow, 23 - 25 November, 2004.

84. A.A. Ivanov, E. A. Vostrikova, G. V. Povolotskaya. "On the Role of Parametric Instability in the Gas Mixing Effect". In: Proc. 22nd Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Cases [SPIG 2004], 23-24 August, National Park Tara, Serbia and Montenegro, p.549, 2004.
85. Andre A. Ivanov and Klaus Wiesenmann. "Ion Confinement in Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS): Importance of Nonlinear Plasma-Wave Interaction". Manuscript. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, No. 6, December 2005, p. 1743, 2005.
86. А. А. Иванов, К. С. Серебрянников, Е. А. Вострикова, «Модель турбулентного нагрева ионов в источнике многозарядных ионов на электронно-циклотронном резонансе». Вестник РУДН, серия Физика, М.: РУДН, с. 15, 2005.
87. A.A. Ivanov, L.I. Elizarov et al. «Differential turbulent heating of different ions in electron cyclotron resonance ion source plasma». Review of Scientific Instruments, vol. 77 (3), 03A327, 2006.
88. А.А. Иванов, Л.И. Елизаров, А.Н. Пастухов и др. «Получение отрицательных ионов водорода в пучково-плазменном разряде». Вопросы атомной науки и техники, № 5, с. 72, 2006.
89. A.A. Ivanov, E.P.Velikhov, V.P.Lakhin, K.S.Serebrennikov "Magnetorotational Instability in Differentially Rotating Liquid Metals". Physics Letters A, 356, 357, 2006.
90. A.A. Ivanov, E.P.Velikhov, S.V.Zakharov, V.S.Zakharov, A.O.Livadny, K.S.Serebrennikov "Equilibrium of Current Driven Rotating Liquid Metal". Physics Letters A, v. 358, p. 216, 2006.
91. А.А. Иванов, В.И. Рыжий, Е.А. Вострикова, В.М. Чечеткин В. М., А.М. Опарин. «Модель источника излучения терагерцового диапазона на основе полевого транзистора». Радиотехника и электроника, т. 54, с. 108, 2008.

ВОСПОМИНАНИЯ

Страницы жизни А.А. Иванова.

Андрей Иванов

Андрей Акимович Иванов родился 24 мая 1939 г. в городе Грозном. Отец - Аким Васильевич Иванов - преподаватель в железнодорожном техникуме. Мать - Антонина Ивановна Иванова - окончила медицинский техникум и работала медицинской сестрой в больнице.

Началась война, отец ушел на фронт, мама работала в госпиталях, затем была заведующей детским садом, и Андрей вместе с ней, в зависимости от военной обстановки на Кавказе, переезжал с одного места на другое.

Кончилась война, отец вернулся с фронта, и семья поселилась в Беслане. В 1946 году Андрей поступил в школу и проучился там три года. После этого отца перевели на новое место работы, и они всей семьей переехали в Кизляр. Там Андрей и закончил школу. Учился он блестяще, ежегодно получал похвальные грамоты, способности у него были как к точным наукам, так и гуманитарным. От деда по материнской линии, бывшего одним из просветителей того времени на Кавказе и на юге России, а также владевшего в совершенстве 12 языками, перешли к Андрею и способности к языкам. Андрей прекрасно знал и свободно разговаривал на шести языках. В школе в качестве основного языка Андрей учил немецкий. Ему повезло с преподавателем, который, будучи немцем по происхождению, хорошо поставил своему ученику берлинское произношение. Отец увлекался техническими новинками, выписывал технические популярные издания и, таким образом, заложил у сына основы интереса к технике, стремление понять и разрешить неясные проблемы и задачи. Андрей много и охотно занимался спортом, защищал честь города на областных спортивных соревнованиях, получал призы, лето обычно проводил в спортивных лагерях. Он ходил и в секцию бокса, и играл в баскетбол, а 100-метровка и тройной прыжок были его любимыми видами спорта.

В 1956 году он окончил школу с серебряной медалью, уехал в Москву и поступил на физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Надо подчеркнуть, что вступительные экзамены в МГУ в то время были более чем серьезными, и поступить туда,

закончив всего лишь кизлярскую общеобразовательную школу, было фактически невероятным событием. На младших курсах Андрей все еще продолжал увлекаться спортом, в том числе бегом на короткие дистанции, но постепенно полностью посвятил себя учебе. В университете он более всего интересовался математикой, физикой, углубленно занимался теоретической физикой, а также начал изучать новый для него английский язык. Преподавательница английского языка, заметив у него способности, занималась с ним дополнительно. В общежитии МГУ в комнате он жил со студентом из Польши и благодаря этому практически выучил польский язык.

В 1962 году Андрей окончил университет по специальности «физика» и успешно сдал «минимум Ландау» - спецэкзамен по теоретической физике. В это же самое время академики А.Д. Сахаров и Я.Б. Зельдович отбирали группу физиков-теоретиков для работы в закрытом городе Арзамас-16 (нынешний г. Саров). В этой группе оказался и Андрей. Так он попал в Арзамас-16, где и проработал с 1962 по 1964 год в теоретическом отделе под непосредственным руководством Я.Б. Зельдовича - одного из создателей советских атомной и водородной бомб. Здесь в 1963 году вышла и его первая статья - «О плавлении при сжатии ударной волной», представленная Я.Б.Зельдовичем в ДАН СССР. Андрей одним из первых в Арзамасе освоил вычислительную технику и начал ей пользоваться для физических расчетов, а в свободное от работы время он занялся изучением еще одного языка - на этот раз французского.

В 1964 году Андрей приехал в Москву и поступил в аспирантуру Института Атомной Энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова, а с 1966 года уже начал работать в ИАЭ в подразделении академика Е.К. Завойского, став сотрудником теоретической лаборатории под руководством Д.А. Франк-Каменецкого. В 1967 году он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Динамика квазилинейной релаксации», научным руководителем диссертации у него был д. физ.-мат. н. Л.И. Рудаков. Всего четыре года спустя (в 1971г) году Андрей защитил докторскую диссертацию «Взаимодействие высокочастотных полей с плазмой», и ему была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук.

В 1968 году он ездил на работу в Чехословакию по приглашению физиков Пражского института физики плазмы, где он работал и одновременно изучал чешский язык.

В 1972 г. по приглашению Индийского правительства Андрей Иванов ездил в Индию, выступал там с лекциями по ядерной физике.

С середины 70-х годов начались его совместные работы с физиками Института электронной физики и с сотрудниками университета в Грайсвальде (ГДР).

Андрей любил природу, в молодости летом ходил в горы, позднее отдыхал с семьёй на Украине. А в последние годы часто свой отпуск проводил на даче в Кубинке, ходил за грибами, занимался с сыном математикой и физикой. На даче ему хорошо работалось: писал лекции и пособия для студентов, статьи, обзоры, готовился к докладам на конференции.

В 1985 году А.А. Иванов перешел на работу в КБ «Салют» на должность заместителя Генерального конструктора по научной работе, занимался космической плазмой.

В 1990 г. А.А. Иванов вернулся в Курчатовский институт и работал Главным научным сотрудником, заместителем директора Института прикладной химической физики РНЦ «Курчатовский институт», а затем заместителем директора по науке института ИВТЭМ РНЦ «Курчатовский институт».

В эти же годы он начал вести совместные работы с физиками Европы: Франции, Голландии, Германии, Румынии и Украины по грантам Комиссии Европейского Сообщества “Copernicus” и “INTAS”. Абсолютное знание шести языков позволяли ему свободно работать с физиками США, Франции, Германии, Голландии, Италии, Чехии, Румынии, Индии, Японии. По приглашению физиков этих стран он часто работал в зарубежных лабораториях.

Совместно с Эколь Политекник (Палезо, Франция) А.А. Иванов занимался теоретическими и экспериментальными работами, связанными с функционированием стационарных плазменных двигателей. С учеными Франции и Германии Андрей много занимался исследованиями в области ионных источников, построенных на принципе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР).

А.А. Иванов много занимался педагогической работой. С 1968 года он начал преподавать в Московском физико-техническом институте на кафедре общей физики сначала в качестве доцента, а затем с 1978 года в должности профессора. Он регулярно читал лекции, руководил работами студентов, дипломников и аспирантов, писал и издавал курсы своих лекций, писал также и статьи в журнал «Физическое образование».

А.А. Иванов интересовался проектам по разработке новой системы образования, вел совместные работы с МФТИ, с РУДН, с Бохумским Университетом (Германия), Эколь Политехник (Франция), Университетом Айзу (Япония) и другими. Под его руководством велись работы в области создания комплекса программно-аппаратных средств и применения их к инновационным образовательным технологиям.

Во время 90-х А.А. Иванов всеми силами старался помочь людям, сохранить и удержать научный потенциал в стране, участвовал в Российских и зарубежных грантах, придумывал и разрабатывал перспективные тематики, искал зарубежных партнеров.

У А.А. Иванова был высочайший уровень знания абстрактной математики и математической физики. Свою приверженность к получению точных аналитических результатов и умению пользоваться математическим аппаратом он старался передать студентам, аспирантам, коллегам.

За время своей научной деятельности А.А. Ивановым было опубликовано две книги, монографии, более пятисот научных статей и учебные пособия для студентов.

Мои встречи с А.А. Ивановым.

Н.С. Ерохин

Первая встреча, где я познакомился с Андреем Акимовичем, произошла в Новосибирске, когда я работал под руководством С.С. Моисеева в Институте ядерной физики, в лаборатории Р.З. Сагдеева. Мне была поручена встреча гостей международной конференции по управляемому термоядерному синтезу, прибывших в аэропорт Толмачево. По дороге из аэропорта в Академгородок, в гостиницу "Золотая долина" состоялся первый разговор с Андреем Акимовичем. Он расспрашивал меня о жизни в Академгородке, моей научной деятельности по физике плазмы, заинтересовался исследованием по построению точно решаемых моделей линейной трансформации электромагнитных волн в неоднородной плазме, расспрашивал об используемых методах описания данного эффекта, его приложениях в к нагреву плотной плазмы электромагнитным излучением, пригласил приезжать в Москву, в Курчатовский институт для участия с докладами в работе семинара и в проводимых Институте конференциях. После моего переезда из Новосибирска в Харьков (Харьковский физико-технический институт) у нас контакты были достаточно редкими. Но в 1982 году я переехал в Москву, в Институт космических исследований, бывал на семинаре в КИАЭ, наши встречи стали проходить чаще. Общение с Андреем Акимовичем всегда было дружеским и полезным. В частности, по поручению С.С. Моисеева я обсуждал с Андреем Акимовичем возможность организации совместного научного проекта по исследованию взаимодействия электромагнитного излучения с ионосферной плазмой, прохождения сигналов от спускаемых космических аппаратов через окружающую их плотную плазменную оболочку на дальние расстояния. Он организовал наш визит в КБ им. Лавочкина на совещание по вопросу разработки технического задания по данной теме. Однако по независящим от нас причинам вопрос финансирования проекта затягивался и ввиду текущих дел я отошел от этой деятельности, но связь с Андреем Акимовичем сохранилась. Мы с ним созванивались, пересекались на Звенигородской конференции, хотя это было довольно редко.

Хочу отметить, что общение всегда носило дружеский и деловой характер.

Известие о кончине Андрея Акимовича я получил спустя три месяца после того, как его не стало. Для меня это было полной неожиданностью. В целом Андрей Акимович оставил у меня хорошее впечатление, мне было интересно с ним говорить, в том числе, по научным проблемам. Конечно, он был известным в науке человеком и жаль, что наше общение не перешло на уровень выполнения совместных работ, написания статей по физике плазмы, что было обусловлено нашей сильной занятостью текущими делами. Мои впечатления от контактов с Андреем Акимовичем самые положительные - это был активный и преданный науке человек.

Мой отец - Андрей Акимович Иванов.

Андрей Иванов

Писать о своем отце всегда сложно. Воспоминания, эмоции и впечатления переполняют и не всегда просто выбрать что-то одно. Постараюсь выделить самые яркие и характерные моменты, которые мне запомнились.

Отец был человеком разносторонним, и помимо занятий наукой у него была масса других интересов. Он обожал иностранные языки, изучал их и увлекался ими, часто даже в обычной речи употреблял иностранные пословицы и поговорки. Интересовался историей, всегда старался получше узнать страну, культуру и историю страны, в которую он ехал. До сих пор помню, как меня поразили в детстве два толстенных тома с иероглифами, которые на поверку оказались китайскими словарями (в какой-то момент отец начинал изучать китайский) или как несколько лет в том же детстве меня интриговало слово «брахманы» в названии книжки по культуре и традициям Индии «Боги, брахманы, люди». Никогда он не пропускал одну из редких в советское время передач, в которой рассказывалось о мировых событиях - «международную панораму». Эту любовь к иностранным языкам и широкий кругозор он всеми силами прививал и мне – с самого детства он занимался со мной английским языком, а летом, на даче, я часто становился свидетелем и невольным участником его собственной подготовки к какой-нибудь поездке, когда он вспоминал и упражнялся то в английском, то в немецком или французском. Занятия со мной были часто весьма неформальными и необычным – это могло быть и с учебником около костра, и на пляже.

Он всегда считал, что занятия наукой – это не работа и не увлечение, а образ жизни. Поэтому у него не было четкого разделения работа - дом, почти каждый вечер и выходные он списывал формулами и рассуждениями десятки листов. Писать сразу на компьютере он не любил, сначала - только на бумаге. Наука для него была не способом чего-то добиться или куда-то пробраться, а именно целью. Он никогда не одобрял посредственных ученых, которые пробивались на должности не благодаря своим научным достижениям, а лишь благодаря связям

или интригам. Кристальная честность не позволяли ему участвовать в каких бы то ни было мутных проектах, на сделку с совестью он не шел никогда, несмотря ни на какие потенциальные выгоды. Эту бескорыстную любовь к науке он старался передать и мне – часто летом, во время отпуска он занимался со мной по школьной программе математики и физики, объяснял, рассказывал и часто брал реальные жизненные ситуации в качестве физических задачек. Например, мы часто и много ходили по подмосковью – по лесам, полям, просто так или собирая грибы. И однажды он заинтересовался, под каким углом к кромке поля надо идти, чтобы наиболее быстрым способом добраться до дома, если скорость ходьбы по лесу и по полю разная. Задача, в принципе, соответствующая распространению света под углом на границе двух сред. Когда что-то мне не давалось, он всегда вспоминал свое детство и ставил себя в пример или старался учиться вместе со мной, при этом твердо настаивая на том, что дело нужно довести до конца. Помнится, когда мы были на отдыхе в Черкассах, мне не давалась таблица умножения, по-моему, для цифр 6 или 7. Начал я ее учить с утра, и продолжал, уже без учебника, но с помощью отца, даже на пляже, куда мы пошли во второй половине дня. Одной из важных его черт было то, что если он что-то начинал, какую-нибудь задачу или статью, он обязательно всегда доводил дело до конца, чего бы это ни стоило.

Его преподавательская деятельность в МФТИ также красной нитью проходила через все его свободное время – он очень ответственно подходил к своим лекциям, и весь август половина каждого его дня уходила на их подготовку, при этом он уединялся в своем импровизированном кабинете на чердаке нашего дачного домика. Там он читал последние научные новости и изучал историю науки, переделывая каждый раз лекции. Как он говорил, «студенты должны знать, что происходит в науке сегодня», и добавлял к лекциям небольшие кусочки последних новостей про ЦЕРН, коллайдеры, поиски бозона Хиггса и т.д. В то же время, изучая историю науки, он любил проследить все события, приведшие к тому или иному открытию, всех людей, участвовавших в этом открытии, и спешил поделиться интересными находкам со студентами, в очередной раз переписывая свои лекции. С моих школьных лет,

например, благодаря своему отцу я знал, что формула Кардано для решения кубического уравнения открыта была совершенно не Кардано, что в средние века были математические турниры, и что история науки не всегда вознаграждает настоящих первооткрывателей.

Отец научил меня на своем примере упорству в работе, способности решать любые проблемы, любознательности, умению быть открытым с людьми, а также привил любовь к языкам. Научил он меня также быть независимым и автономным, преодолевать препятствия и быть уверенным в том, что любой предмет можно изучить и стать в нем специалистом, нужно лишь этого захотеть и потрудиться. Вся его жизнь этому пример – начав свой жизненный путь в провинциальной кизлярской школе и не имея ни одного знакомого или родственника в Москве, он стал ученым с мировым именем, внесшим существенный вклад в развитие физики плазмы и в историю ИАЭ им. Курчатова.

Легенда физтеха, корифей "курчатника".

В.И. Ильгисонис

Любой физтех* образца 70-х – 80-х годов XX века знал о наступлении в конце третьего курса «Юрьева дня» — главного события в жизни студента, во многом определяющего дальнейшую судьбу человека. В это время ты мог выбрать любую специальность, в том числе на другом факультете, вне зависимости от того, в какой группе обучался ранее. Разумеется, тебя могли и не взять, если показатели учебы были не на высоте; для поступления на наиболее интересные специальности даже проводились экзамены и неформальные собеседования. К примеру, в две теоретические группы — В.Л. Гинзбурга при теоротделе ФИАНА и Л.П. Горькова при ИФТ им. Л.Д. Ландау — конкурс превышал 15 человек на место, т.е. был выше, чем при поступлении в МФТИ.

В 1978 г., когда с проблемой такого выбора столкнулся и автор этих строк, в группу Гинзбурга отобрали, по-моему, двух человек, а к Горькову — одного. Что же касается других групп, то наиболее предусмотрительные студенты заранее договаривались с потенциальными научными руководителями, используя личные контакты, «наводки» со стороны старшекурсников и аспирантов, в общем, кто во что горазд.

На физхиме** к числу групп, особо интересовавших студентов, относилась «вторая группа» с базой в ИАЭ им. И.В. Курчатова. Попавшие сюда студенты могли получить в руководители таких столпов плазменной науки, как Л.И. Рудаков, А.С. Кингсеп, В.Д. Шафранов или даже самого Б.Б. Кадомцева, заведовавшего кафедрой физики и химии плазмы. Особняком ходили «иванóвцы», попавшие под патронаж Андрея Акимовича Иванова, человека, чьё имя в кулуарах физхима произносили с лёгким придыханием. Иванов набирал студентов не каждый год, и попасть к нему считалось удачей. Не потому, что работать у него было легко и приятно, отнюдь.

* не только МФТИ – Московский физико-технический институт, – но и студент указанного института.

** Обиходное название факультета молекулярной и химической физики МФТИ, ныне ФМБФ – факультет молекулярной и биологической физики.

Известно, что «Акимыч», как его называли между собой студенты, был весьма жёстким «шефом», строго требовал соблюдения дисциплины и абсолютного подчинения. Нерадивые могли быть с позором выгнаны даже перед самым дипломом, и их последующая судьба была незавидной.

Но зато те, кому удавалось удержаться в «обойме Акимыча», об этом никогда не жалели. В конце 1970-х Андрею Акимовичу около сорока, он недавно защитил докторскую и находится в самом расцвете творческих сил. Он в числе классиков квазилинейной теории и один из основателей пучкового термояда, человек широчайшего кругозора и высокой математической культуры. Казалось, он знает всё! Известны случаи, когда на семинарах в курчатнике он мог перебить докладчика резким вопросом и, если тот оказывался в замешательстве, сам же отвечал на него, фактически, строя новую теорию на глазах у слушателей. Неудивительно, что студенты (и, особенно, студентки!) смотрели на такого профессора с обожанием, ловя каждое слово.

Так получилось, что, поступив в теоргруппу Гинзбурга, я, тем не менее, оказался в ИАЭ им. И.В. Курчатова, но не в команде Андрея Акимовича: он в ту пору, возглавляя лабораторию плазмохимии, занимался экспериментами с плазменно-пучковым разрядом и его многочисленными практическими приложениями, а я хотел быть теоретиком. Через некоторое время я с удивлением узнал, случайно разговорившись с приятелем из команды "Акимыча", что он, оказывается, наслышан обо мне и даже благосклонно отзывался о моих первых работах по теории магнитного удержания плазмы, хотя его интересы в то время лежали уже совсем в другой области и наши отношения сводились лишь к редким контактам на заседаниях теоретического семинара М.А. Леонтовича, куда он эпизодически заходил. Будучи человеком деятельным и увлекающимся, он азартно участвовал в нередких тогда дискуссиях, разворачивавшихся на этом семинаре, с интересом встречая и критикуя новые идеи. Кроме того, как секретарь парткома Отделения физики плазмы он, несомненно, был в курсе всего происходящего в коллективе.

Более тесным наше взаимодействие стало гораздо позже, когда в 2003 г. Е.П. Велихов решил инициировать в

Курчатовском центре*** работы по исследованию явления магнитовращательной (или «магниторотационной» — на иностранный манер) неустойчивости (МВН). История этих работ довольно любопытна. В 1959 г. Е.П. Велихов¹ обнаружил, что гидродинамически устойчивое течение Куэтта[†] может дестабилизироваться в случае проводящей жидкости под действием однородного магнитного поля — эффект довольно неожиданный, т.к. традиционные работы по магнитной гидродинамике (МГД) свидетельствовали о стабилизирующей роли магнитного поля. Тем не менее, результат был получен аналитически безупречно и не вызывал сомнений.

Но всплеск интереса к этому эффекту возник лишь после появления в 1991 г. статьи Бальбуса и Хоули² в связи с бурным развитием астрофизики. Оказалось, что МВН является, по сути, единственной известной неустойчивостью, которая может быть ответственна за турбулизацию вещества в аккреционных дисках — величина обычной (нетурбулентной) вязкости слишком мала для объяснения аккреции. В 1990-е годы в мире активно ведутся теоретические работы по исследованию МВН, а с 2001 г. стартуют попытки экспериментального обнаружения МВН в лабораторных условиях. Соответствующие установки появляются в США, Японии, Германии. Все они основаны на механическом вращении проводящей среды, в качестве которой лучше всего использовать жидкий металл — натрий или галлий, у которых максимально отношение проводимости к вязкости. Эксперимент с вращением жидкого натрия куэттовскими цилиндрами довольно сложен: нужно обеспечить полную герметичность подвижных соединений, ведь натрий весьма агрессивен и пожароопасен. Е.П. Велихов предложил обойти эти трудности, закручивая натрий в неподвижном контейнере, пропуская через него электрический ток в радиальном направлении. В магнитном поле под действием силы Ампера

*** Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова в 1991 г. переименован в Российский научный центр «Курчатовский институт», а в 2010 г. преобразован в Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

¹ Велихов Е.П. — ЖЭТФ, 1959, т.36, с.1192

[†] дифференциальное вращение жидкости (обычно — между двумя цилиндрами, вращающимися соосно с разной угловой частотой)

² Balbus S.A., Hawley J.F. — *Astrophys.J.*, 1991, v.376, p.214.

жидкая проводящая среда придет во вращение с профилем скорости, подходящим для наблюдения МВН.

Андрей Акимович сразу загорелся этой идеей, ему вообще было свойственно увлечение новым. Беспроигрышное рутинное уточнение старых теорий и ранее полученных результатов — «дожевывание», как у нас говорят, — его никогда не устраивало. Он берется за общую организацию работ по МВН. Установку решено делать в Обнинске: в ФЭИ в группе В.С. Федотовского был опыт работы с натрием, кроме того, у них есть отличный магнит с подходящими параметрами. Я в то время был начальником Отдела теории плазмы, и меня попросили привлечь двух-трёх человек для аккуратного теоретического обоснования и сопровождения эксперимента. Кроме этого, Андрей Акимович сам с небольшой группой своих сотрудников немедленно начал аналитические прикидки и — немного позднее — численные расчёты. Эти предварительные исследования показали принципиальную реализуемость планируемого эксперимента и одновременно необходимость дальнейшего детального теоретического анализа, поскольку только таким способом могли быть выявлены многие важные нюансы исследуемого явления, например, форма и размеры пристеночных слоёв, их влияние на профиль скорости течения в основном объёме, реальный порог МВН с учётом диссипативных эффектов и другие.

К сожалению, как часто бывает в нашей жизни, события развивались отнюдь не оптимальным образом. Кропотливые теоретические исследования требовали времени, и обнинцы соорудили установку, ориентируясь на имеющиеся у них возможности. Оказалось, что раскрутить натрий до скоростей, приводящих к МВН, не удаётся. Когда же вскоре нами была построена исчерпывающая теория диссипативных МГД-течений в таких системах и разработан соответствующий численный код, причины неудачи стали очевидны; также стало совершенно ясно, как именно надо сделать установку для наблюдения МВН. Однако в Обнинске интерес к этой проблеме уже был потерян, к тому же сколько-нибудь заметного финансирования исследований тогда получить не удалось, и работы велись, по существу, на энтузиазме. Так что

эксперимент по лабораторному наблюдению МВН еще ждёт своей очереди.

Тем не менее, эта деятельность не прошла бесследно. Благодаря энтузиазму и активности Андрея Акимовича и, конечно, самого Е.П. Велихова, к проблеме было привлечено внимание не только в Курчатовском институте. Ею заинтересовались в Академии наук, в частности, в ИПМ им. М.В. Келдыша, Институте динамики геосфер и др. В значительной степени усилиями А.А. Иванова и его правой руки — Александра Николаевича Пастухова, на плечи которого легла основная организационная работа, — были проведены 3 Международных семинара по МВН. Нашими исследовательскими группами было опубликовано более 20 работ, в том числе, в ведущих мировых журналах, что, несомненно, укрепило авторитет российской научной школы в этой области науки. Характерный пример: мой тогдашний аспирант, И.В. Хальзов, внесший ключевой вклад в численное моделирование МВН, впоследствии защитил PhD-диссертацию в одном из канадских университетов, где она была признана лучшей диссертацией университета по физическим и инженерным наукам и удостоена золотой академической медали генерал-губернатора Канады. Ныне И.В. Хальзов работает в Висконсинском университете г. Мэдисон, США.

Научные заслуги А.А. Иванова, автора более пятисот научных работ и десятка монографий хорошо известны. Остановлюсь ещё раз на том, что особенно запомнилось в общении с ним. Во-первых, это мгновенно формирующееся впечатление, что перед тобой яркая личность, индивидуальность. Во-вторых, это могучий интеллект, не показной, а истинный, глубокий. В-третьих, это обаяние, которое притягивает. И, наконец, то, что все эти ощущения с течением времени не ослабевают, разочарование не наступает; он действительно таков, каким кажется. Таким он и остался в памяти.

Воспоминания об Андрее Акимовиче Иванове.

О.В. Курко

...Позвольте пару слов без протокола...

Наступил Покров 14 октября 2007 г. С утра на лес тихо падал снег. Так продолжалось 3 дня. В безветренной тишине трещали сломанные снегом деревья. А бездонно чёрной ночью вспыхивали молнии – где-то замыкались провода ЛЭП.

Возвратившись в Москву, я узнал, что в те дни Андрей Акимович неожиданно умер, и его уже похоронили. На 9-й и 40-й день были небольшие встречи, где разные люди вспоминали Андрея Акимовича.

Я познакомился с Андреем Акимовичем в 1972 г. Это было в коттедже М. К. Романовского. Как я понимаю, тогда происходил выбор лидера лаборатории нового направления в науке – «плазмохимии». Михаил Кириллович уговорил меня тогда перейти из МИФИ («от МИФИ до Мечты – один шаг») в «Курчатовский институт», где больше науки, но с карьерой придётся подождать.

Через короткое время я очутился в ОРП (отдел Релятивистских Пучков), в команде Андрея Акимовича, где готовилось образование ЛПХ (лаборатория Плазмохимии). От тех времён осталось ощущение мощного и быстрого мышления Андрея Акимовича, хотя мне не особенно нравился его «фольклорный» русский. Правда, в дальнейшем я узнал, что Андрей Акимович свободно владел несколькими языками, что он в Европе за неделю общения осваивал диалект, так что его трудно было отличить от аборигена. И русский язык не был исключением. В зависимости от ситуации Андрей Акимович свободно использовал и литературный, и официальный, и фольклорный русский. В общем-то, это соответствует его же теореме: «Талантливый человек в чём-то талантлив везде».

С другой стороны, когда я познакомился с трудами Огюста Эскофье («короля поваров и повара королей»), где не лишними были слова «посолить и поперчить», я понял, что в кулинарии смыслов Андрей Акимович был в своей тарелке.

И, наконец, вспомним Священное Писание. Иисус Христос говорил со своими учениками притчами и только притчами (Евангелие от Иоанна, 17:25 и др.), давая им возможность понять трансцендентное через обыденное, часто бывшее в то время. ... У Андрея Акимовича было много учеников. Подозреваю, что для кого-то из них те сочные и скоромные вставки в речи Андрея Акимовича могли служить эмоциональной зацепкой, позволяющей лучше запомнить и понять непростые истины современной науки.

Одним из первых и весьма полезных событий в ЛПХ был общий Ликбез. Мне ещё в ОРП пришлось осваивать курс Физики Плазмы Франк-Каменецкого. А тут между сотрудниками была поделена таблица Менделеева и что-то ещё, с тем, чтобы определить стоимости получения разных веществ, и их пригодность в качестве мишеней для плазмохимии. Наконец, были курсы образовательных лекций, которые мы друг другу читали на семинаре ЛПХ.

Из тех времён вспоминаются отдельные события. Как-то на первой школе по плазмохимии весной в средмашевском пионерском лагере (с очень хорошим поваром), представители ЛПХ играли между собой в футбол. Довольно быстро меня поставили в ворота из-за моих туристических ботинок и опасной неуклюжести, и я смог наблюдать игру как бы со стороны. При этом Андрей Акимович запомнился своими ловкими финтами и уходами, быстротой и натиском. Зрительное впечатление было ярким, и до сих пор из памяти легко всплывают как бы куски спортивного фильма с Андреем Акимовичем в главной роли.

Другая картинка из жития ЛПХ. Как обычно, мы несколько задержались на работе. И вот вечером из секретариата сообщили, что к нам едет ... «Главкомандующий». Это было интересно, и мы пошли на В-1 или В-2 (установки с вращающейся плазмой), куда-то на антресоли большого экспериментального зала в здании ОПИ-1. Слева бодро и светло вращалась опасная плазма, у пульта стояли и сидели сотрудники, и Андрей Акимович перегораживал узкий проход к установке. Мы в небольшом закоулке, и в метре перед нами тесно стояли Главком Горшков и свита адмиралов. Главком маленький и чем-то недовольный, погоны какие-то пыльные, а в свите все рослые и лощёные. Помню, что было чувство какого-то несоответствия, наверно

потому, что мы очень уж штатские, стоим не по стойке «смирно» и честь не отдаём. Но Андрей Акимович как всегда виртуозно излагал суть дела ... доступно и убедительно.

Работая в советской науке, не замкнёшься в башне. Неизбежны были выезды в подшефные совхозы и на овощные базы (бывало, самые грязные и тяжёлые работы). Тогда я это осуждал. Теперь же, сквозь призму времени, вижу это как забавный опыт в процессе познания, дающий более широкий взгляд на бытие и экономику. К тому же, эти «выезды» были объединяющим фактором. В общем простом труде и за общим столом ... профессиональные связи дополнялись «товарищескими» отношениями. В ощущении жизни появлялись «дополнительные измерения».

В последний свой год Андрей Акимович иногда рассказывал мне и о современной физике, и об эпизодах собственной жизни.

Как он говорил, в МГУ его раз 6 выгоняли из комсомола за развод. Поэтому, хотя он кончил «супертеоретиком» (в дипломе было что-то про «группы Лоренца»), распределили его учителем в Удмуртию. Но тут появились Сахаров с Зельдовичем и устроили нечто вроде олимпиады для молодых теоретиков. Когда Андрей Акимович там появился, все 60 теоретиков из 3-х групп уже были в зале. Испытуемых посадили в рядок, вызывали по одному. Первая задача была - объяснить различие взаимодействий p - p и p - n . По первому разу никто не смог. А по второму «... его знает, как», но Андрей Акимович задачку решил. Другие задачки, по словам Андрея Акимовича, были проще. Так, вместо Удмуртии Андрей Акимович попал в «зону» к «Зельду».

У «Зельда» в решении задачи о кривой плавления металлов Андрею Акимовичу помогло хорошее знание немецкого и английского. Там была, как говорил Андрей Акимович, мощная «немецко-фашистская» библиотека, где он обнаружил важную статью с экспериментальными данными. Она натолкнула его на идею, которую он смог упорядочить, используя тамошний компьютер («Стрела», кажется, или М-20), программируя «в кодах». После экспериментальной проверки этой идеи работа Андрея Акимовича была опубликована в ДАН СССР. Было ему тогда 22 ... «Не ... собачий» - так выразился по этому поводу Андрей Акимович, если память не изменяет ...

Потом были какие-то задачи по Теории Относительности, о которых Андрей Акимович как-то скептически отзывался, и была командировка в Москву, где Андрей Акимович искал себе научного руководителя и познакомился с Л. И. Рудаковым. Насколько помню, Андрей Акимович всегда хорошо отзывался о Рудакове, вроде как считал его талантливее себя, называл его «человеком ярким». Одной из трудностей было то, что плазмы Андрей Акимович тогда не знал, не учили его плазме. Но зато он хорошо знал то, чего не знали плазмисты ... В общем, экзамен по специальности он сдал на 5.

Вспоминая былые победы, Андрей Акимович неоднократно говорил, что это всё благодаря его «бэкграунду», фундаментальным основам в физике и математике (и в иностранных языках), которые он вовремя воспринимал и в школе, и в МГУ, и у «Зельда», и потом. К тому же, как он выражался, его «гнал страх». Может, это арзамасский след, может что другое, ... не знаю. Один из последних его «страхов» - это то, что сейчас ни у кого фундамента нет, «это не теоретики – это анекдот» ...

Люди, проходя по жизни, неизбежно меняются. Но навсегда, пока они живы, в них существуют психологические константы, когда-то, в особые периоды «запечатления» врезанные в сознание на всю оставшуюся жизнь. Так, вспоминая перестроечный период, когда страсть многих людей к «потреблятельству» перестала сдерживаться, Андрей Акимович говорил о раннем детском впечатлении. На его глазах забили ногами насмерть вора, укравшего буханку хлеба. Впечатление было сильное, и Андрей Акимович говорил, что на всю жизнь понял – «воровать нельзя». Отчасти поэтому он считал, что научная деятельность и предпринимательство несовместимы.

Как-то мы обсуждали с ним национальные особенности чехов, словаков и поляков, их диалектов и религиозных пристрастий. Поскольку чехи были основателями протестантизма за 100 лет до Лютера, была затронута и эта тема. Андрей Акимович считал, что протестанты были более эффективны в развитии своих наций, и приводил в пример различие протестантских, католических и православных стран. Более ранние конфессии он сравнивал с однопроцессорной IBM, тогда как у протестантов параллельные процессоры, так как, по

Лютеру, «Бог в каждом». Себя он считал более близким по духу к французским гугенотам, тем, кто уцелел после «ночи товарища Варфоломеева», - так он говорил.

Высокий уровень интеллекта и открытость – сочетание этих качеств неизбежно должно было вызвать неприязнь у некоторых людей науки. С другой стороны, несмотря на грубую иногда оболочку, реальная жизнь показала высокие моральные качества Андрея Акимовича, которые могут подтвердить множество его учеников и научных соратников, а также люди, бескорыстно поддержанные им в простых и трудных ситуациях.

О пользе людей со «сложным характером» (вспоминая А.А. Иванова).

А.А. Лукьянов

С Андреем Акимовичем Ивановым я был знаком с 1984 г., когда пришел на работу в Институт атомной энергии им. Курчатова («Курчатник») после 3-х лет работы в «почтовом ящике». Я не был его учеником в буквальном смысле слова (дипломником или аспирантом): до п/я я закончил физический факультет МГУ, его же аспирантуру; там и защитился. Моим научным руководителем в МГУ был большой ученый и человек известный как человек со «сложным характером» – В.Л. Бонч-Бруевич. К тому времени я уже уяснил себе, что именно люди с так называемым сложным характером оказывают тебе в жизни решающую помощь. (В жизни каждого из нас была масса милых и любезных людей, которых «почему-то» не оказывалось на месте, когда вам плохо.)

Вторым таким человеком со сложным характером и оказался Андрей Акимович Иванов. То, что я не был его формальным учеником, упрощало, думаю, наши отношения. Во всяком случае, он не относился ко мне как мальчику, которому он когда-то «подтирал нос».

С момента знакомства с ним было ясно, что человек он незаурядных способностей. Причем, речь идет не только о физике. Поражала его широчайшая образованность – от иностранных языков до истории и литературы, в которых он, казалось, знал самое интересное. – Есть ведь масса знатоков совершенно несносных своей скучностью! – С Андреем «Акимычем» (про себя я называл его «акынычем») скучно не было! Это был человек необыкновенного чувства юмора. К сожалению, для многих оно было несколько язвительным. Но беда в том и состояла, что слишком часто оно оказывалось, что называется, в точку! Его короткие (одной фразой, даже – одним словом) характеристики людей были удивительно точны (хотя иногда и аллегоричны). Скорее всего, многие из них доходили до адресатов. Вряд ли это увеличивало число его друзей. Но таково свойство всех людей талантливых: характер у них простым не бывает. – Потому что они вообще не просты!

Удивляла широта его научной образованности. Однажды я спросил его (на всякий случай! а вдруг знает!) о том, кто занимался рассеянием носителей заряда в тонких пленках – и сходу получил практически исчерпывающий ответ. А ведь формально он был специалист в физике плазмы! Это он меня («твердотельщика») мог бы спросить об этом самом.

Вспоминаю, как мы с ним писали статью (тогда еще только делали работу; мы еще не знали, что получится статья) о таутохроне – кривой, период колебаний частицы вдоль которой в поле тяжести не зависит от амплитуды. «Акимыч» позвал меня к себе и стал задавать всякие вопросы. Далее было рассуждение вслух. Кто-нибудь на моем месте сказал бы, наверное, что все ответы получил именно он. – Но были бы ответы, если б не было вопросов?! – Все вопросы крутились вокруг одного центрального – «Каким образом Гюйгенс смог догадаться, что такой кривой будет циклоида?» – Работы Гюйгенса у нас под рукой, естественно, не было, – и нужно было по возможности реконструировать возможный ход мысли классика. Потом, когда задача была решена и даже была опубликована статья в журнале «Физическое образование в вузах», мы выяснили, что восстановили ход мысли другого классика – Ландау. – Тоже не стыдно!

Вспоминаю еще, как мы писали с ним статью для того же журнала про многозарядные примеси в полупроводниках. Я тогда еще не работал в МФТИ, но однажды «Акимыч» принес задачу с физтеховского ГОСа. Мне он сказал примерно так: «Ты у нас специалист по полупроводникам? – Вот, и думай, как просто решить задачу». (На ГОСе было дано неверное решение.) Но было важное «лагранжево» условие: нужно было придумать решение, обойдя большое каноническое распределение (БКР), т.к. студенты 3-го курса физтеха его еще не знают (в основной своей массе). Пришлось все же для начала решать задачу «честно» – через БКР. (Ведь еще не был известен правильный ответ!) После того как мы это сделали (численно на компьютере), каждый из нас придумал и «простой ход». Об обоих «ходах» мы рассказали в статье. Добавлю еще, что когда я говорил, что задача была решена численно на компьютере, я вовсе не имел в виду, что решил задачу я, а «Акимыч» лишь «идейно руководил»: он параллельно делал вычисления. Это вообще был стиль его

работы – не формальное «идейное руководство», но конкретная работа его самого. Почти всегда, когда я заходил к нему в кабинет, он сидел за «компом» и «корежил» какую-нибудь программу в «МАТНЕМАТИСА» Wolfram'a.

После того, как мы сделали статью для «Физического образования в вузах» про таутохрону, я доложил ее на семинаре кафедры общей физики МФТИ. После доклада меня пригласил к себе заведующий кафедрой А.Д. Гладун и предложил работать у них по совместительству. Я не сомневаюсь, что попал на физтех именно благодаря Андрею Акимовичу. Позже у нас с «Акимычем» были разные отношения. – Сложные, так скажу. – Я, рыжий, тоже – не подарок. Но я никогда не забуду, что именно Иванов привел меня на физтех.

Как относились к нему на физтехе? – Как и полагается: по-разному. – Физтех есть физтех. Там, безусловно, очень много очень умных людей, которые к тому же очень высокого о себе мнения. – Просто так там тебя хвалить или восхищаться тобой не станут. Но, проработав на физтехе 10,5 лет, я могу с уверенностью сказать: к «Акимычу» на физтехе относились очень уважительно. Однажды речь зашла о физике, читаемой на 3-ем курсе. «Акимыч» как раз ее и читал. Кто-то высказался в том смысле, что курс «Акимыча» перегружен теоретической физикой. А ведь это – курс общей физики. (Я был, кстати, того же мнения). Но тут нас быстро урезонил один сотрудник кафедры и бывший студент «Акимыча» – Дима Александров. Точнее так: собственно ему физику на 3-м курсе читал кто-то другой, но (!) он и его друзья ходили на лекции именно «Акимыча», чтобы послушать эту теорфизическую общую физику! – Разные студенты бывают на физтехе с разными запросами! – Нужна, оказывается, и «теорфизическая общая физика»!

Последняя наша совместная работа с «Акимычем» – снова статья в журнале «Физическое образование в вузах» по гидродинамике. Долгое время мне не давала покоя одна задача – об истечении идеальной жидкости из вертикального цилиндрического сосуда через малое отверстие внизу. Формально – задача нестационарная (вся жидкость из сосуда выльется), – но при ее решении пользуются уравнением Бернулли, полученным для стационарного случая. (Родственной этой оказалась другая задача – о поршне, выдавливаемом

жидкость из цилиндра через малое отверстие (велосипедный насос, спринцовка).) Однажды мне пришла на ум некая идея. Я довольно быстро оформил ее, численно решив задачу средствами «МАТНЕМАТИСА» Wolfram'a. (Позже оказалось, что задача допускает и аналитическое решение.) На следующий день у меня были занятия на физтехе, и я обсудил решение с коллегами, выбирая отнюдь не «мальчиков». Все в один голос сказали: «Разумно». И лишь когда я спустя некоторое время рассказал о задаче «Акимычу», тот сходу (сходу!) показал мне, что в задаче есть тонкость. Оказалось, что отличие моего решения от классического – лишь на малых начальных временах движения. – И вот тут вопрос: «А ты проверял, что жидкость можно считать несжимаемой?» Я пользовался тем, что вся жидкость (например, в задаче о поршне) сразу приводится в движение. Одновременно во всех местах. Но, строго говоря, сначала по жидкости должна пройти упругая волна, которая бы и вовлекла всю жидкость в движение (ту ее часть, которая вдали от поршня). Обычно считается, что это – самые малые времена в задаче. Но и мои начальные времена тоже были маленькие. – А кто кого меньше? – Это еще надо проверить! – И мимо этого сюрприза проскочил и я, и те мои коллеги (не «мальчики»!) с физтеха, которым я рассказал о своем решении. – «Акимыч» сходу почувствовал, что все не так просто. – Изложение решения задачи пришлось изрядно перекраивать. – И «Акимыч», я считаю, стал ее полноценным соавтором. С «Акимычем» было интересно обсуждать задачи. Интересно было узнавать его мнение о задаче, о ее решении. Конечно, он был образованней меня, но он не боялся ошибиться, рассуждая.

Когда Андрея Акимовича не стало, я понял, что потерял человека, с которым можно было обсудить любую задачу из любого раздела физики. – Запросто обсудить: никакой фанаберии с его стороны я никогда не чувствовал. Это не значит, что к нему входили, пнув ногой дверь. – Не таков был характер хозяина кабинета. Порой это был человек даже с крутым характером. – И, тем не менее, он был очень доступный. Совсем не часто можно встретить большого ученого, мнение которого о твоей задаче тебе было бы интересно знать, но который бы еще и выслушал тебя и сложил мнение о твоей задаче. – Квалифицированное и не тривиальное мнение! – А.А. Иванов был таким.

Воспоминания о моем друге Андрее Акимовиче Иванове.

Марта Бакал

Я впервые встретила Андрея Акимовича Иванова на международной конференции по плазмохимии в Риме (Италия) в 1975 году. Он произвел на меня очень сильное впечатление, сделав несколько докладов (за себя и за других коллег из русской делегации) на прекрасном английском языке.

Вновь я увидела Андрея Акимовича лишь в 1992 году, когда посещала Институт Атомной Энергии им. Курчатова в Москве. Андрей Акимович вспомнил нашу встречу в Риме, и пригласил меня пообщаться в свое научное отделение. Эта встреча была началом нашего сотрудничества.

В течение следующих лет Андрей Акимович провел несколько месяцев в моей лаборатории (лаборатория ионизированных сред в Эколь Политекник), в течение которых он разрабатывал темы, связанные с интересующей меня водородной плазмой, содержащей отрицательные ионы. Он с энтузиазмом брался разбирать вопросы, которыми мне приходилось заниматься. Его сотрудничество для меня было бесценным.

Андрей Акимович легко общался и находил общий язык с людьми, вне зависимости от их возраста, характера и уровня образования. Благодаря этой его черте во время пребывания в нашей лаборатории, я открыла для себя многочисленные научные интересы Андрея Акимовича и в других областях.

Среди них, в частности, можно упомянуть его заинтересованность физическими механизмами в плазменных движках. В 90-х годах я занималась экспериментальными исследованиями космических движков, основанных на эффекте Холла. Глубокое понимание Андреем Акимовичем физических процессов в этих приборах оказалось очень важным для наших совместных проектов.

Еще одной гранью его личности, которая мне запомнилась, был его интерес к преподаванию физики в целом и физики плазмы в частности. Его опыт в этой области существенно упрощал наше сотрудничество и общение, он мог доступно и

понятно объяснять сложные физические явления. Его талант педагога воплотился и в руководстве более 30 кандидатскими диссертациями. Его преподавательская деятельность вылилась, помимо прочего, в две книги («Физика сильнонеравновесной плазмы» 1977г. и «Неравновесная плазмохимия» 1978г.), в 10 монографий и несколько учебных пособий.

Теоретические работы А.А. Иванова опубликованы в более чем 500 статьях в различных научных журналах, наиболее ключевые из них были изданы в 2012 г в его книге «Научные труды».

Одной из важнейших черт характера А.А. Иванова была его трудолюбие. Часто на работу он приходил раньше остальных сотрудников, чтобы обдумать какую-нибудь новую теорию в спокойной обстановке. Так что его рабочий день начинался рано утром, и продолжался до позднего вечера. В выходные он тоже часто работал дома.

Помимо этого, я также узнала о его усилиях по воспитанию сына и желанию обеспечить ему высокий уровень образования: обучение иностранным языкам, научное образование в области физики.

О моём многолетнем друге и выдающемся учёном Андрее Иванове.

А.Б. Михайловский

С Андреем Акимовичем Ивановым я познакомился в середине 60-х годов, но особенно сблизился с ним в период нашей поездки в Прагу в августе 1968г. По его рассказам, на сколько мне помнится, он закончил физфак МГУ, после чего был направлен на работу в ядерно-оружейный центр Арзамас-16. Ему каким-то образом удалось оттуда выбраться, и он стал работать (в качестве аспиранта, затем м.н.с.) в Курчатовском институте в коллективе, возглавляемым академиком Евгением Константиновичем Завойским. Его непосредственным научным руководителем был Леонид Иванович Рудаков. Андрей занимался проблемой взаимодействия высокочастотных полей с плазмой. Я полагаю, что в этот период он получал научную поддержку не только от Рудакова, но и от Давида Альбертовича Франк-Каменецкого и Е.К. Завойского.

Август 1968 г. – это период так называемой «пражской весны». Я ездил туда на две недели, а он – на месяц. Мне удалось выехать оттуда до вступления в Чехословакию наших войск. Помню, как Андрей провожал меня на вокзале. Через несколько дней после моего отъезда Чехословакия была оккупирована нашими войсками. Чехи стали подозрительно относиться к находившимся там советским гражданам. Андрей потом рассказывал мне, что как-то во время его обеда в каком-то кафе к нему подошли чехи и стали спрашивать, кто он. Андрей в совершенстве знал английский язык и ответил: «Я - англичанин». Тогда его спросили: «А почему у тебя советские часы?» Андрей не растерялся и ответил: «Советские часы такого же качества, как и швейцарские, но стоят дешевле». Чехи от него отстали.

Вспоминается работа, авторами которой были Иванов, Рудаков и Тайхман. Тайхман – это чех, который иммигрировал на запад еще до начала «пражской весны».

Помню также о работе, авторами которой были Иванов, Крашенинников и Соболева. Кажется, мне присылали её на отзыв из ЖЭТФа. У меня были к ней какие-то замечания, я их согласовал с Андреем и написал положительный отзыв.

Важной вехой в научной биографии Андрея был его обзор в 6-м выпуске «Вопросов теории плазмы» под редакцией М.А.Леонтовича. К публикации этого обзора приложил руку и я. Разъясню, что каждый выпуск ВТП подготавливался каким-либо инициатором, который играл роль советника Леонтовича. Инициатором этого выпуска был я. Мне надо было опубликовать там один из своих обзоров. Но в каждом выпуске должно было быть опубликовано несколько обзоров. Я спросил у Андрея, нет ли у него материала, на основе которого он мог бы написать обзор в ВТП. Андрей ответил, что он мог бы написать обзор по взаимодействию высокочастотного поля с плазмой. Я пригласил в качестве авторов обзора также Митю Рютова и Лёню Соловьева. Леонтович одобрил мой выбор, в результате чего и появился обзор Андрея.

Затем Андрей перешел из подразделения Завойского в отделение физики плазмы в качестве начальника отдела плазмохимии. Персонал этого отдела состоял из ряда бывших сотрудников коллектива Е.К. Завойского. Подробности этого мероприятия мне не известны, но я предполагаю, что у Андрея были какие-то оригинальные идеи, которыми он заинтересовал более высокое начальство. Судя по всему, Андрей достиг в плазмохимии выдающихся результатов, свидетельством тому являются несколько его обзоров в сборнике «Химия плазмы». Совместно с Таней Соболевой Андрей написал книгу по физике плазмы. Как мне представляется, это была весьма добротная книга. Одним из сотрудников Андрея был Вася (Василий Владимирович) Параил. Андрей попросил, меня быть одним из официальных оппонентов Васи. Я согласился. Защита диссертации Васи прошла успешно. Потом Вася устроился в отделе токамаков и достиг там существенных успехов.

Андрей много внимания уделял партийной работе. Несколько лет он был секретарем партийной организации отделения физики плазмы. В ту эпоху проходили демонстрации по случаю первого мая и седьмого ноября. Помню Андрея, идущего во главе колонны Курчатовского института.

В начале 80-х годов я как-то встретился с Андреем в автобусе и мы разговорились. Я сообщил ему, что у меня есть серьезные трения с руководством теоротдела. На это он предложил мне перейти в его отдел, сказав, что я там смогу

заниматься тем, чем хочу. Кроме того, он сообщил мне, что собирается расстаться с некоторыми из своих теоретиков. Он обещал также, что если я перейду к нему, то он создаст мне в своем отделе теоретическую группу из выпускников физтеха. Так началось моё активное научное сотрудничество с Андреем. Мы действовали в двух направлениях. С одной стороны я должен был проэкзаменовать некоторых из его теоретиков, а с другой – заняться набором молодежи. Сережа Крашенинников, блестяще разобрался с данной ему статьей. Мы пригласили в отдел Андрея Никиту Попкова, работавшего до этого в отделе, в который были переведены Сережа Крашенинников и Таня Соболева. Кроме того, у Андрея был еще теоретик - Олег Курко. Я стал помогать этим теоретикам.

Теперь обратимся ко второй части нашей программы с Андреем: набору молодежи. У Андрея была помощница на физтехе: Оля Азарова, после замужества принявшая фамилию Бакшеева. По согласованию со мной она вывесила на физтехе объявление примерно следующего содержания: «Студенты не ниже 3-го курса, желающие заниматься теорией плазмы под руководством профессора А.Б. Михайловского, могут позвонить по такому-то телефону». Там был указан номер моего домашнего телефона. Мне стали звонить многие студенты с различных факультетов. Моя жизнь круто изменилась: ко мне домой приходили молодые люди, которым я давал определенные задания. В результате мне удалось отобрать человек 10, с которыми я стал работать. Естественно, каждого из отобранных студентов надо было как-то организационно обеспечивать. Андрей решил эту проблему так: он сказал, что на ФОПФ-е (факультете общей и прикладной физики) в качестве зам. декана работает Федор Федорович Каменец. Андрей организовал мои контакты с ним. В результате проблема организационного обеспечения «моих» студентов была решена. Обстоятельства, однако, сложились так, что я передумал переходить в отдел Андрея. Мы договорились, что будем и дальше помогать друг другу по мере своих возможностей.

Через пару лет после описанных событий Андрей перешел на работу в какой-то другой научно-исследовательский институт, заняв там должность зам. директора института. Но после нескольких лет работы там, по неизвестным для меня причинам,

он снова вернулся в наш институт. К этому времени Курчатовский институт состоял из ряда более мелких институтов, которые раньше назывались отделениями. Андрей называл эти институты «бантустанами». Андрей стал, насколько я помню, зам. директора одного из таких бантустанов. В последующем наши встречи с Андреем были довольно эпизодическими. Мы встречались, как правило, во время обеденных перерывов при посещении институтской столовой. При этом мы всегда перекидывались несколькими фразами. Андрей говорил, что у него «барахлит сердечко». Его беспокоило также, куда ему пристроить сына, которого, как и отца, назвали Андреем. Насколько я помню, Андрей-младший также был физиком-теоретиком.

Где-то на рубеже веков Андрей сообщил мне, что в Москву прибывает из Праги наш общий друг чех Карел Юнгвирт, который к этому времени стал одним из руководителей Чешской академии наук. Андрей организовал мою встречу с Карелом. По окончании нашей встречи мы созвонились с Андреем, и я «передал» Карела. Это была наша последняя встреча с Андреем. Затем я узнал, что Андрей возглавил экспериментальные исследования в институте, руководимым Аликом Фридманом.

Известие о смерти Андрея было для меня большим ударом. Долго не верилось, что Андрея больше нет. Андрей был крупнейшим ученым мирового класса, и память о нем должна всячески сохраняться.

Памяти Андрея Акимовича Иванова.

В.П. Милантьев

Современная физика плазмы создавалась трудами многих ученых в этой области. Среди них был Андрей Акимович Иванов, человек разносторонних интересов и больших организационных способностей. Он был не только блестящим ученым-физиком, но и прекрасным учителем, передавая свой богатый опыт и знания молодому поколению физиков. Его книга «Физика сильнонеравновесной плазмы», изданная в 1977 году, до сих пор служит отличным пособием для подготовки специалистов в области физики плазмы.

Проводя большую научную и организационную работу в «Курчатовском институте» и преподавая в МФТИ, он находил время для сотрудничества с кафедрой экспериментальной физики российского университета дружбы народов (РУДН). Сотрудничество завязалось много лет назад благодаря личным контактам профессора кафедры экспериментальной физики К.С. Головановского с Андреем Акимовичем. Затем контакты были продолжены доцентом В.В. Андреевым. В этих контактах выявились общие интересы, приведшие к возможности сотрудничества. К сотрудничеству Андрей Акимович относился с характерной для него ответственностью и доброжелательностью. В рамках сотрудничества Андрей Акимович руководил научной работой двух аспирантов кафедры, которые успешно защитили кандидатские диссертации. Студенты РУДН, специализирующиеся по кафедре экспериментальной физики, получили возможность проходить практику в Курчатовском институте и выполнять там курсовые и выпускные работы. Расширились также возможности подготовки аспирантов.

Андрей Акимович был горячим сторонником внедрения в учебный процесс современных информационных технологий. Поэтому он активно участвовал в ежегодных конференциях, проводимых в РУДН совместно с компанией National Instruments. Несомненно, что сотрудничество кафедры с Андреем Акимовичем способствовало повышению уровня научной работы и подготовки физиков в РУДН. Думая о развитии нашего сотрудничества, Андрей Акимович предложил идею пригласить

В.И. Ильгисониса, руководителя теоретического отдела в Курчатовском институте, для заведования кафедрой экспериментальной физики.

Прошедшие пять лет после кончины Андрея Акимовича показали, насколько мудрой и дальновидной была его идея. Беседы с Андреем Акимовичем всегда были интересными, неординарными и оставляли глубокое впечатление. Он был прост и приятен в общении, при этом любил повторять: «я понятно говорю?».

Имя Андрея Акимовича Иванова, замечательного ученого и прекрасного человека, запечатлено в его многочисленных трудах и останется в памяти всех, кто имел удовольствие общаться с ним.

Вспоминая А.А. Иванова.

Е.А. Нюхалова (Вострикова)

С 2003 по 2007 год мне довелось проходить стажировку, а затем и работать в Отделе прикладных исследований ИВТЭМ, входящий в этом время в состав РНЦ «Курчатовский институт». Отдел возглавлял профессор, доктор физико-математических наук Андрей Акимович Иванов.

Под руководством Андрея Акимовича за очень короткий срок (в течение 3-х лет) я написала и защитила кандидатскую диссертацию на тему «Механизм нагрева ионов в ЭЦР ионных источниках, учитывающий параметрические неустойчивости» на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Замечательный ученый и педагог, за время моей стажировки и работы в РНЦ «Курчатовский институт» (а это всего лишь 4 года!) Андрей Акимович преподавал нам (своим аспирантам и студентам) углубленный курс физики плазмы и современной теоретической и математической физики, вовлекал в работу международных научных проектов по исследованию ионных источников и многих других проектов, которые он возглавлял или курировал.

Все это в значительной степени позволило мне написать и защитить кандидатскую диссертацию под его руководством.

Кроме того, Андрей Акимович всегда делился своим многолетним преподавательским опытом в Московском физико-техническом институте, дал мне возможность работать со студентами МФТИ на базе РНЦ «Курчатовский институт» и сумел очень хорошо подготовить меня к работе преподавателем кафедры общей физики МФТИ.

Андрей Акимович запомнился мне как ученый, обладающий «даром слова». Он был очень хорошим рассказчиком с прекрасным чувством юмора. Его колкие и меткие комментарии мне всегда вспоминаются в тяжелых жизненных ситуациях и помогают их преодолеть.

Мне также запомнилось, что Андрей Акимович неоднократно убеждал своих учеников и сотрудников, прошедших его научную школу, работать или преподавать (по своему выбору) и дальше в российских или международных

научных институтах. При этом с присущим ему чувством юмора он часто повторял, что «нельзя играть на скрипке днем в консерватории, а ночью в кабаке», что, в сущности, отражает его непоколебимую позицию по отношению к науке.

Большой ученый и учитель.

А.Н. Пастухов

В 2003 году на совещании в кабинете Е.П. Велихова я познакомился с Андреем Акимовичем. В то время он был увлечен работой по созданию интерактивной программы обучения школьников физике, а я работал в ИСФТТ начальником группы и занимался вопросами автоматизации физических экспериментов и созданием компьютерных сетей. Андрей Акимович активно привлек меня к работе над этой программой.

Итогом нашей совместной работы стало создание программ «Тьютер» и «конструктор» и это было доложено на международной конференции, которая проходила в Университете дружбы народов в 2003 году и на следующий год - в 2004 году. В этом же году Андрей Акимович пригласил меня к себе в отдел прикладных исследований.

Андрей Акимович уделял большое внимание подготовки научных кадров, он преподавал в МФТИ и его курс лекций пользовался большим успехом. Он постоянно работал с аспирантами, которые успешно защищались, и всему этому не мешала его большая занятость на основной работе как физика-теоретика. Каждый рабочий день он начинал с обсуждения идей, которые у него рождались за ночь. Приходилось удивляться на его огромную трудоспособность. Он себя полностью отдавал науке.

Андрей Акимович много работал с компьютером, особенно с математической программой, которая помогала ему при решении дифференциальных уравнений и освобождая его от рутинных выкладок.

Андрей Акимович очень переживал, что его сын Андрей не стал физиком, а увлекся компьютером и построением компьютерных сетей. Надо отметить, что в этом деле он преуспел.

В 2006 году Иванов А.А. стал инициатором проведения международного семинара по магниторотационной неустойчивости в астрофизике и физике Земли. Благодаря его научным связям в работе семинара приняли участие как зарубежные ученые: Гюнтер Рюдигер из Астрофизического института города Потсдам, Германия; Даниель Латроп из

университета города Мериленд, США; Ганс Гудблуд - Институт физики плазмы, Нидерланды; так и российские: из РНЦ «Курчатовский институт»; ГНЦ-ФЭИ город Обнинск; Физического института им. Лебедева РАН; Института Астрофизики РАН; ИПМ им. М.В. Келдыша и института геосфер РАН.

Через два года работы по изучению магниторотационной неустойчивости (Андрея Акимовича к этой работе привлек академик Е.П. Велихов) он понял, что надо развивать работы этого направления в институте им. И.В. Курчатова, и была написана служебная записка на имя Е.П. Велихова с предложением организовать в отделе прикладных исследований лабораторию, которая занималась бы этой тематикой.

Но было принято решение об организации института физики стохастических структур, директором которого был назначен академик Фридман А.М., а его заместителем по науке должен был стать Андрей Акимович Иванов, но занять эту должность он не успел.

Учитель.

А.В. Переславцев

Судьба меня свела с Андреем Акимовичем Ивановым в 1986 году, когда проработав в ИАЭ им. И.В.Курчатова 11 лет без трёх месяцев в должности инженера после окончания с красным дипломом МВТУ им. Н.Э.Баумана, я пришёл работать в КБ «Салют» на должность начальника группы.

Андрей Акимович Иванов тогда уже работал в КБ «Салют» заместителем генерального конструктора. В его ведении находились вновь создаваемые научные подразделения, в задачу которых входило научное сопровождение проектов создания космического оружия на новых физических принципах. Создать работоспособный научный коллектив с новыми задачами на базе известной космической фирмы со своим сложившимся коллективом – задача очень не простая. Но, тем не менее, в кратчайшие сроки этот процесс на моих глазах произошёл.

Роль А.А. Иванова в этом была определяющей. Андрей Акимович умел подобрать ключик к каждому своему сотруднику, определить его место в коллективе и сделать этот коллектив коллективом единомышленников. Помню, как меня делали секретарём первичной парторганизации нашего направления: все мои попытки отвертеться были безуспешны, пришлось работать. Полученные первые результаты показали реальность создания образцов космического оружия.

Из-за прошедших изменений в стране в 90-е годы у руководящей элиты появились другие интересы, и система стала разваливаться. Не желая в этом участвовать, Андрей Акимович ушёл с руководящих постов и вернулся к научной работе в «Курчатовский институт».

Я тоже вернулся в «Курчатовский институт» и пришёл работать к Андрею Акимовичу в 1994 году. Выполняя функции зам. начальника отдела, я довольно много работал с Андреем Акимовичем. В эти сложные годы Андрей Акимович был генератором идей по целому ряду научных задач, таких, как например, прикладные применения пучково-плазменного разряда, интерактивные обучающие программы по общей физике. Реализация этих идей осуществлялась в рамках совместных работ

по ФЦП «Интеграция» с Московским физико-техническим институтом, Российским университетом дружбы народов.

Проводились совместные работы с Ecole Polytechnique (Франция). К этим работам как экспериментальным, так и теоретическим, активно привлекалось молодое поколение исследователей: студентов, инженеров, учёных и аспирантов, как российских, та и иностранных.

В 2000 - е годы Андрей Акимович не гнушался и таких тем как физика дугового разряда, развивая новые подходы к расчётам электродуговых плазмотронов. Можно долго и много говорить обо всех его безграничных талантах, колоссальной работоспособности и широких научных горизонтах, позволю себе выделить главное. Этот человек умел быть Учителем (с большой буквы), который не только передавал окружающим свои знания, но и умел учить преодолевать самые сложные ситуации в жизни и всегда умел прийти на помощь в трудную минуту.

Во всяком случае, для меня он остался Учителем, низкий ему поклон.

Звездные войны профессора А. Иванова.

О.Н. Пивоваров

В судьбах ученых XX века (как, впрочем, и во все иные времена) случались события, когда их интеллект призывался на службу Молоху. Самая престижная на сегодняшний день премия планеты носит имя А. Нобеля – создателя динамита. Общеизвестны имена Р. Опенгеймера, Э. Тэллера – отцов атомной и водородной бомбы в США и их визави в СССР – И.В. Курчатова и А.Д. Сахарова. И хотя последние десятилетия жизни Э. Тэллер использовал свою известность частично в мирных целях, продвигая глобальные экологические проекты, а А.Д. Сахаров стал известным демократом, все же их основные научные результаты – дань Молоху.

На фоне столь известных фигур, определивших ход «холодной войны» и ограничения на масштаб всех последующих войн человечества, казалось бы, нескромно отмечать роль профессора А. Иванова в эпизодическом дуэльном противостоянии великих держав США и СССР в «Звездных войнах» конца XX века. Однако это было реальное глобальное противостояние с огромным напряжением интеллектуальных сил с обеих противоборствующих сторон с огромными финансовыми затратами.

Именно поэтому стоит оттенить роль одного из интеллектуальных лидеров, которому удалось в этом, в общем-то, неблагоприятном деле, внести конструктивный вклад, не только уменьшивший потери державы, но и заложивший задел на перспективу.

Хотя сами «Звездные войны» - программы СОИ США – АнтиСОИ (СССР) готовились задолго до их разворачивания. Мы с профессором А. Ивановым встретились лишь в начале 1985 года в головной фирме СССР, которой было поручено разрабатывать все боевые космические комплексы.

Доктор физико-математических наук, профессор Андрей Акимович Иванов был приглашен Генеральным конструктором КБ «Салют», кандидатом технических наук Дмитрием Алексеевичем Полухиным в качестве заместителя по научным вопросам. В преддверие масштабной космической программы (в

США уже шло развертывание работ по Стратегической оборонной инициативе) это назначение согласовывалось в Политбюро ЦК КПСС. Вся предыдущая научная деятельность А. Иванова была связана с Минсредмашем: работа в Арзамасе-16 и в институте им. И.В. Курчатова. Работа в главных плазменных проектах с самыми выдающимися учеными страны, такими, как академики Я.Б. Зельдович, Л.А. Арцимович, М.А. Леонтович, Е.К. Завойский, Д.А. Франк-Каменецкий и преподавание на кафедре общей физики Московского физико-технического института.

Такой крупный специалист как А. Иванов для руководства разработками, основанными на новых физических принципах, был совершенно необходим в ракетно-космическом центре. Ему было поручено руководить разработкой и созданием боевых космических комплексов, оснащаемых в качестве оружия и информационных систем всеми чудесами науки и техники, до которых на этот момент додумалось человечество.

В отличие от А. Иванова, автора этих строк привели в КБ «Салют» собственный авантюризм и желание получить возможность реализовать некий научный замысел. В течение ближайших месяцев был подписан приказ о моем назначении исполняющим обязанности заместителя Генерального конструктора – руководителя направления космических вооружений и энергетики. В отличие от А. Иванова мое назначение не обсуждалось в Политбюро, и юридически в нашем тандеме А. Иванов занимал старшее положение. Так началось наше шестилетнее сотрудничество в КБ «Салют» и последующая дружба до последних дней жизни А. Иванова. А такой тандем был совершенно необходим, поскольку на неподготовленное руководство предприятия «свалили», фактически, весь интеллектуальный потенциал державы, в виде комплексов научно-технических изобретений, объединенных в боевые космические аппараты и космические системы.

В результате сложного взаимодействия элит родилась удивительная научно-техническая программа «Звездных войн», основу которой составляли вооружения на новых физических принципах. Ведущие предприятия стран – потенциальных противников взялись строить лазерные, пучковые,

электродинамические пушки и размещать их на космических аппаратах.

Заместитель по науке Андрей Иванов поддержал все мероприятия по наведению порядка в управлении программой, которые было вынуждено проводить сформированное направление космических вооружений и энергетики. Более того, использовал свой авторитет для утверждения экспертного уровня сопровождения всех видов разработок, основанных на новых физических принципах. В результате в течение, буквально, года нашей совместной работы в кооперации предприятий сформировалась атмосфера реалистичности и исполнительской дисциплины.

Это стало возможным лишь постольку, поскольку нам совместно с А. Ивановым удалось в кратчайший срок привлечь команду интеллектуалов из ведущих предприятий страны, не только не поссорившись с руководством этих предприятий из-за переманивания кадров, но и укрепив научно-производственные связи. Во многом это происходило из-за того, что Андрей был интеллигентным, энциклопедически образованным, совершенно не конфликтным человеком, что привлекало талантливых специалистов. В атмосфере, когда министерство и Военно-промышленная комиссия и оборонный отдел ЦК на первых порах контролировали такие экономические параметры как скорость набора людей и объем израсходованных средств, качество сотрудников было важнейшим фактором успеха.

В этот период единственным правильным решением со стороны СССР была такая организация работ, которая могла бы максимально уменьшить бессмысленные затраты и получить максимальную стратегическую выгоду. А. Иванов, как человек высокой ответственности не мог позволить себе допустить «халтуру» в программе мирового уровня.

Поэтому, фактически, при поддержке А. Иванова, как ответственного за научный уровень работ по созданию космического оружия и средств энергетики на новых физических принципах, коллектив единомышленников выработал позицию минимизации национального ущерба от программы «Звездных войн». Мы приняли решение вкладывать финансовые ресурсы не столько в эфемерные космические крейсера, сколько в мозги специалистов сферы высоких технологий по всей стране и в

разработку самих новейших технологий, с перспективой их использования во всех отраслях промышленности. Здесь мы были полностью едины и были поддержаны как руководством предприятия, министерства, так и руководством всего военно-промышленного комплекса.

Здесь следует отметить, что высочайшая квалификация профессора А.А. Иванова никогда не была использована в поддержку деструктивных тенденций. Его научная и человеческая принципиальность всегда была выше всех похвал.

Поскольку профессор А. Иванов имел большой опыт работы в системе АН СССР, то он, как заместитель Генерального конструктора по науке (второй человек на предприятии по Положению, согласованному с ЦК КПСС) и взял на себя весьма не простую роль модератора в системе Академия наук – Военно-промышленный комплекс.

Было сформировано жесткое управление гигантской кооперацией, замыкавшейся на КБ «Салют». Что и было сделано в кратчайшие сроки автором этих строк при полной поддержке руководства фирмы, Министерства, Военно-промышленной комиссии, соответствующих отделов ЦК КПСС. Поскольку формальное научное руководство Программой было закреплено за АН СССР, было важно уменьшить уровень постоянных конфликтов. Эту вынужденную роль модератора играл А.А. Иванов. Имея прекрасные отношения с Президентом Академии академиком А.П. Александровым, возглавлявшим одновременно Курчатовский Центр, Андрей прекрасно справился с этой совсем нелегкой задачей.

Тяжело подводить итог жизни яркого человека, полного интеллектуальных сил, прожившего всего 68 лет. Человека, в сотрудничестве и последующей дружбе с которым прожиты очень яркие два десятилетия. В сотрудничестве с ним удалось сформировать интеллектуальную среду с таким потенциалом, который не одно десятилетие мог бы определять инновационное развитие страны. Мы со всеми нашими коллегами всегда будем с благодарностью помнить годы совместной работы и общения. Андрей участвовал в общих делах интеллектуальной команды до последних дней жизни.

Как это было или история одной плазмохимической империи.

В.В. Старых

С Андреем Акимовичем Ивановым я познакомился в 1967 г., когда на 5-ом курсе МИФИ проходил преддипломную практику в ИАЭ им. И.В. Курчатова в секторе 74 академика Е.К. Завойского (впоследствии Отдел релятивистских пучков - ОРП).

В то время мы занимались исследованиями турбулентного нагрева плазмы в тороидальной установке «Вихрь-2» и при проведении экспериментов по рассеянию электромагнитных волн в плазме обнаружили эффект появления сильно анизотропных длинноволновых ионно-звуковых колебаний, который никто не мог объяснить, пока им не заинтересовался Андрей Акимович Иванов. Он вывел закон развития спектра возникающих в плазме высокочастотных ионно-звуковых колебаний при пропускании тока и объяснил механизм последующей перекачки энергии в низкочастотную область спектра за счет индуцированного рассеяния ионно-звуковых колебаний на ионах. По результатам этих исследований нами была опубликована совместная статья в Журнале экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ, 62, 1362, 1972).

С тех пор началось наше сотрудничество, и завязались хорошие отношения.

Андрей Акимович был очень общительным, коммуникабельным человеком, живо интересовался всем новым не только в науке, но и во всех сферах жизни. Талант ученого и высокая работоспособность позволили ему быстро сделать научную карьеру. В 1967 году он защитил кандидатскую диссертацию, а в 1971 г. – докторскую.

В 1972 году А.А. Ивановым было предложено новое направление – неравновесная плазмохимия и разработана программа исследований нового типа низкотемпературного разряда - плазменно-пучкового разряда в химически активной плазме.

Эта программа получила поддержку академиков В.А. Легасова и Л.А. Арцимовича, и А.А. Иванову было предложено

создать и возглавить лабораторию плазмохимии (ЛПХ) в отделе плазменных исследований (ОПИ) Л.А. Арцимовича.

Получив это предложение, А.А. Иванов стал формировать команду единомышленников, готовых рискнуть отправиться к неизведанным берегам.

В тот первый набор ЛПХ вошли 9 человек из ОРП: теоретики В.В. Параил, Т.К. Соболева, О.В. Курко; начальники экспериментальных групп В.В. Шапкин (плазменные центрифуги), С.Л. Недосеев (молекулярные пучки), В.В. Титов (плазмохимические реакторы), молодые экспериментаторы В.А. Никифоров, А.И. Бабарицкий. Получил предложение войти в теоретическую группу и я.

По распоряжению Л.А. Арцимовича в состав ЛПХ были включены научные сотрудники и инженеры из ОПИ: Ю.Ф. Наседкин (начальник группы микроэлектроники), Г.Б. Левадный, В.М. Атаманов, Л.В. Славнов, А.А. Никуличев, а также лаборанты и механики высочайшей квалификации: М.М. Михайлов, А. Власов, А.Д. Илюхин, Б.Н. Травников, И.К. Кархачев, А. Аверин, В.П. Ханин, А.А. Рыбин.

Андрей Акимович обладал удивительным даром убеждения, умел просто и доходчиво объяснить суть физических законов и явлений, умел увлечь собеседника и заразить его энергией созидания, соучастия в предлагаемых проектах. Показателен в этом отношении пример Б.И. Хрипунова, который перешел в 1977 году в ЛПХ из Минатома, хотя мог сделать блестящую карьеру в МАГАТЭ.

А.А. Иванов умел находить и подбирать нужных сотрудников. Очень быстро лаборатория расширилась почти до 50 человек и стала мощным научным подразделением, готовым вести исследования самым широким фронтом. Кроме вышеупомянутых групп В.В. Шапкина, С.Л. Недосеева, В.В. Титова, Ю.Ф. Наседкина в ЛПХ вошли группы Б.И. Патрушева (ВЧ и СВЧ плазмотроны), В.А. Беляева (атомно-молекулярные столкновения), пришли талантливые теоретики С.И. Крашенинников и П.Н. Юшманов. Под руководством А.А. Иванова работа в лаборатории шла полным ходом. Строились оригинальные установки «В-1», «В-2», «Пласт», «Спрут», «Лента» и др., одновременно велась теоретическая проработка экспериментальных проектов, поиск прикладных задач, объектов

внедрения разработок. Было ощущение, что зарождается новая могучая плазмохимическая суперимперия.

Андрей Акимович много внимания уделял вопросам повышения квалификации сотрудников, расширению их научного кругозора. По его инициативе в лаборатории еженедельно теоретики проводили занятия для всех научных сотрудников и инженеров, на которых изучались как общие фундаментальные курсы (теория плазмы, теория газового разряда, квантовая механика и др.), так и специализированные курсы по тематике научных исследований ЛПХ.

Регулярно работал научный семинар ЛПХ, на котором докладывались и обсуждались оригинальные работы и проекты.

В лаборатории царил командный дух, научный азарт, атмосфера ожидаемого большого научного прорыва. Никто не смотрел на часы, расходились с работы вместе с Андреем Акимовичем обычно не раньше 22-23 часов, уставшие, насквозь прокуренные, но счастливые, если что-то удавалось постичь или сделать.

Я помню, в те годы даже 31 декабря уходили с работы за пару часов до боя курантов.

Азарт и дух здорового соперничества присутствовали постоянно и на ежегодно проводившихся различных школах, симпозиумах и конференциях.

Мне особенно запомнился Второй Всесоюзный симпозиум по плазмохимии, который проходил в Риге в 1975 году. За прошедшие три года существования лаборатории мы уже получили первые обнадеживающие экспериментальные результаты и сильно продвинулись в теоретических изысканиях в области кинетики химических реакций в сильно неравновесной плазме. По этой тематике А.А. Ивановым с соавторами было опубликовано много ключевых статей, но публичных выступлений на конференциях Всесоюзного и международного масштаба пока не случалось. На эту конференцию в Ригу вместе с А.А. Ивановым были делегированы В.В. Шапкин, А.И. Бабарицкий и я.

По поручению академика В.А. Легасова на этой конференции А.А. Иванов должен был сделать обзорный доклад на пленарном заседании об успехах в развитии нового

направления – неравновесной плазмохимии и о перспективах использования плазменно-пучкового разряда в плазмохимии.

Однако, не успели мы приехать в Ригу и разместиться в гостинице, как организаторы Симпозиума (естественно, сторонники традиционной равновесной плазмохимии) сообщают нам, что в регламенте пленарного заседания произошли изменения и доклад А.А. Иванова снимается и переносится на заседание какой-то второстепенной секции.

Но не так-то просто оказалось перекрыть нам дорогу. В курсе наших разработок и достижений был академик Рыкалин Николай Николаевич, с лабораторией которого в Институте металлургии им. А.А. Байкова мы сотрудничали.

И вот, вечером на «военном совете» в гостинице была выработана тактика выступления А.А. Иванова. Дело в том, что Н.Н. Рыкалин должен был открыть пленарное заседание и сделать на нем 45-минутный доклад. Н.Н. Рыкалин предложил сделать следующее: он откроет заседание, сделает 5-минутное выступление, а оставшиеся 40 минут предоставит для выступления А.А. Иванову.

Все получилось так, как было запланировано. Андрей Акимович получил микрофон из рук Рыкалина и сделал блестящий доклад, который произвел огромное впечатление на специалистов и вызвал широкий резонанс среди научной общественности.

Прошло уже много лет, но я до сих пор вспоминаю те чувства, которые охватили меня после этого выступления, чувства восторга, восхищения и гордости за Курчатовский институт, за Рыкалина, за Иванова, за всех нас. На моих глазах вершилась история науки!

Надо ли говорить, что после таких поступков Андрей Акимович стал в глазах наших молодых научных сотрудников героем, а если добавить к этому его врожденное чувство юмора, манеру на равных говорить и с академиками, и с аспирантами, и со студентами, и с лаборантами «на картошке», то можно смело сказать, что он стал кумиром всей лаборатории.

Мы с нетерпением ждали возможности принять участие в многочисленных симпозиумах, конференциях, школах, семинарах.

Андрей Акимович готовил нас к этим мероприятиям, развивал в нас «спортивный научный азарт», которым в полной мере обладал сам, тренировал выступления и реакцию на вопросы и реплики из аудитории. Кроме того, само участие в научных конференциях вместе со своим научным руководителем А.А. Ивановым и, особенно, успешные выступления на них с докладами надолго поднимали настроение и создавали праздничную атмосферу того, что ты занимаешься нужным и полезным делом.

А.А. Иванов придавал большое значение международному сотрудничеству с учеными различных стран. В 1974 году он включил С.Л. Недосеева и меня в делегацию в ГДР, целью которой было установление научных контактов с коллегами из ГДР. По результатам этой поездки в 1975 году был заключен договор на 5 лет о научном сотрудничестве с Институтом электронной физики и кафедрой физики университета в г. Грайсвальде в ГДР.

По поручению А.А. Иванова мне пришлось готовить этот договор и планировать его этапы на 5 лет вперед, а также согласовывать с немецкой стороной. К моему изумлению, спустя несколько лет оказалось, что все этапы, которые мы спланировали с Андреем Акимовичем, практически не требуют никакой коррекции.

В рамках этого договора я несколько раз выезжал в ГДР, где работал в Грайсвальде совместно с теоретиками Р. Винклером и И. Вильгельмом.

Согласно поставленной А.А. Ивановым задаче, мы разработали методику расчета функции распределения электронов по энергиям в плазменно-пучковом разряде с учетом упругих и неупругих столкновений электронов с невозбужденными молекулами, а также с учетом кулоновского взаимодействия заряженных частиц.

Кроме того, мы разработали модель и провели численные расчеты по сравнению функций распределения и макроскопических свойств электронов в плазме плазменно-пучкового и тлеющего разрядов при одинаковой удельной мощности, вкладываемой в единицу объема плазмы.

Результаты этих работ были доложены на различных международных конференциях и опубликованы в журналах

Beiträge aus der Plasma Physik, Journal de Physique, Физика плазмы, ЖТФ, а также легли в основу моей кандидатской диссертации, которую я защитил в 1979 году под руководством А.А. Иванова.

Андрей Акимович не был кабинетным ученым. Большую часть времени на работе он проводил не в «высоких» кабинетах, и даже не в своем кабинете, а среди своих сотрудников. Чувствовалось, что ему нужна аудитория, на ней он проверял свои воззрения, свои идеи, а порой, даже и свои чувства.

Быстрый ум и умение тонко подмечать все оттенки реакции собеседника позволяли ему уточнять и совершенствовать свои научные модели и прогнозы, а также модели человеческих взаимоотношений, коим он также придавал немаловажное значение, хотя, на мой взгляд, они часто и не заслуживали такого внимания со стороны действительно великого ученого.

Мы его любили. Любили и ревновали. Ревновали к коллегам, к друзьям и даже к любимым женщинам. Возможно, похожие чувства он испытывал и по отношению к нам. Порой возникало ощущение, что ему трудно представить, что человек может дружить не только с ним.

С тех пор прошло почти 30 лет. Как ни странно, все мы, кто когда-то работал с А.А. Ивановым и по тем или иным причинам расстался с ним, до сих пор дружим, и редкие наши встречи не обходятся без воспоминаний о лучших годах жизни, проведенных рядом с ним.

Видимо, масштаб личности А.А. Иванова таков, что, единожды попав на орбиту его притяжения, трудно ее покинуть.

И надо ли?...

Сила притяжения.

Б.И. Хрипунов

После окончания Московского инженерно-физического института в 1969 году и двухлетней работы в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) в лаборатории С.Ю. Лукьянова в Отделе плазменных исследований с 1971 года я работал в Министерстве среднего машиностроения (Госкомитете по использованию атомной энергии СССР). В мои обязанности входила организация научно-технического сотрудничества в области атомной энергии с зарубежными странами – Францией, Швейцарией, Японией. До этого времени со Швейцарией у нас организованного сотрудничества практически не было, мне было поручено подготовить соглашение о сотрудничестве с научными организациями Швейцарии, в которое был включен, в частности, раздел «физика плазмы». В 1973 году состоялся обмен ознакомительными делегациями специалистов в этой области. В состав делегации со стороны СССР вошли три человека – Иванов А.А., Пистунович В.И. и Хрипунов Б.И.

Мы посетили научные организации и фирмы Швейцарии, в которых проводились работы по изучению и использованию плазмы в технологиях – Эколь Политекник в Лозанне, университеты в Цюрихе, Невшателе, Берне, ЦЕРН.

Так я и познакомился с Андреем Акимовичем. Но это знакомство не было поверхностным, поскольку я уже много слышал об Андрее Акимовиче от моих сокурсников по МИФИ, работавших в Институте атомной энергии в то время в его лаборатории. После этого знакомства Андрей Акимович предложил мне перейти на работу к нему в лабораторию. Однако этому переходу предшествовал период, когда, работая в ГКАЭ СССР, я поступил в вечернюю аспирантуру ИАЭ по специальности «Физика и химия плазмы». Думаю, что со мной согласятся все знавшие его люди в том, что знакомство и общение с ним оказывали мощное влияние на них, я не был исключением и в этот период испытал мощное воздействие А.А. Иванова, как физика, щедро распространявшего свои знания, опыт и физическое мышление на всех, кто был рядом с ним.

Дело в том, что в семидесятые годы в Отделе плазменных исследований ИАЭ была создана Лаборатория плазмохимии, которую и возглавил А.А. Иванов. Организацию лаборатории ему доверил академик Л.А. Арцимович, который на фоне значительных успехов в развитии работ по высокотемпературной плазме и УТС уже давно намеревался организовать исследования других возможностей применения плазмы. В эти годы А.А. Иванов сумел собрать в лаборатории молодых, энергичных и талантливых сотрудников, выпускников МФТИ, МИФИ, МГУ, МХТИ, которые активно разрабатывали эту фактически новую область физики плазмы. Ранее работы по химическим реакциям в плазме в других институтах относились к плазме с низкой степенью ионизации, что и определяло возможности соответствующих плазменных систем. Андрей Акимович инициировал анализ традиционных плазменных систем и дал толчок поиску новых подходов в использовании плазмы для целей плазмохимии, причем упор был сделан на плазменные системы непрерывного (не импульсного) действия. Исследовались два основных направления – проведение химических реакций в плазме и разделение ионов по массам во вращающейся плазме. Были созданы принципиально новые системы на основе пучково-плазменного разряда (ППР), в которых плазма создается с помощью электронного пучка, включая разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Сказался опыт, А.А. Иванова и В.В. Шапкина (тогда зам. начальника Лаборатории плазмохимии), приобретенный ими ранее в исследованиях взаимодействия пучков с плазмой и пучкового нагрева в Отделе релятивистских пучков.

В середине семидесятых годов большой интерес возник к использованию вращающейся плазмы для проведения процессов разделения – к созданию плазменной центрифуги. Опыты на различных вариантах плазменных центрифуг со слабоионизированной плазмой показали возможность наблюдения разделения, но в то же время становилось очевидным, что даже при стационарном действии они имеют почти ничтожную эффективность для получения разделенных по массам элементов, не говоря уже о разделении изотопов. В лаборатории А.А. Иванова была создана установка В-2 с новым видом стационарного пучково-плазменного разряда - ППР в

скрещенных электрическом и магнитном полях, в котором создавалась плазма с высокой степенью ионизации (~ 1). На ней экспериментально было продемонстрировано сначала разделение элементов благородных газов, а затем и изотопов неона ^{20}Ne - ^{22}Ne . Эффект разделения был получен в практически безотборном режиме работы, однако успех в проведении разделения был настолько значительным (коэффициент разделения 1,2), чтобы на этой основе ставить вопрос о создании плазменной разделительной установки. И такая задача была поставлена при поддержке руководства ИАЭ (академика В.А. Легасова). Встал вопрос о разработке в Лаборатории плазмохимии плазменной установки для разделения изотопов лития. Разработка безамальгамного плазменного метода разделения изотопов лития представляла практический интерес для предприятий Министерства среднего машиностроения, включая Новосибирский завод химконцентратов. Смелость в постановке именно такой задачи вполне отвечала характеру Андрея Акимовича Иванова, его личности как ученого. Нужно отметить, что, будучи по сути физиком-теоретиком, он внимательно следил за каждым шагом в экспериментальной работе и подвергал все получаемые результаты тщательному анализу и физическому обоснованию необходимых шагов направленных на повышение результатов.

Для реализации решения о работах по разделению изотопов лития в Лаборатории плазмохимии была создана новая группа физико-химических технологий, которая в недалеком будущем насчитывала 14 человек и включающая научных сотрудников и инженеров. А.А. Иванов пригласил меня на работу начальником этой группы. «Настал час икс – переход получил разрешение» - позвонил мне Андрей Акимович в августе 1977 года, и я вернулся в ОПИ ИАЭ для работы в его лаборатории. Задача группы состояла в скорейшем создании плазменной установки на основе ППР в скрещенных полях для разделения изотопов лития и проведении на ней экспериментальных исследований. Мне тогда пришлось одновременно решать несколько очень непростых задач – во-первых, необходимо было осознать все особенности подобной плазменной системы, принимая во внимание, что нужно было перейти с газообразного рабочего тела на металлический литий. В тоже время я должен был активно

участвовать в подборе кадров в группу, организации разработки установки и взаимодействии с Новосибирским заводом химконцентратов, в создании конструкции и изготовлении основных элементов установки, подготовке площадки для строительства установки в ИАЭ (в выбранном для строительства здании Огра-2 были созданы рабочие помещения и пультовая комната), в создании и реализации проектов электропитания и управления установки, обеспечении основным вакуумным и другим оборудованием. Сейчас это может показаться преувеличением, но установка была создана за год, а ее физический пуск состоялся в октябре 1978 года. В создании установки приняли активное участие коллективы различных подразделений отделов ОПИ и ОГРА, отдел капитального строительства ИАЭ, МСУ 97, МСУ-98. Роль А.А. Иванова в этой деятельности, как организатора, трудно переоценить, поскольку его целеустремленная личность и научный авторитет позволили получить активную поддержку руководства ИАЭ, привлечь к этому строительству всех необходимых людей и организации.

Так была создана установка, получившая название «СПРУТ» – стационарная плазменная разделительная установка. Наш опыт работы с литиевой плазмой не возник сразу после начала экспериментов. Отрабатывались различные элементы системы - конфигурация магнитного поля, устройство разрядной зоны, электронного инжектора, осваивались методы подачи лития в разряд и отбора продукта, и, наконец, были разработаны и освоены методы анализа изотопного состава лития. Реальный успех пришел после многих лет кропотливой и трудной работы, когда установка показала высокий коэффициент разделения в режиме с отбором рабочего вещества, что фактически свидетельствовало о создании разделительной системы. В дальнейшем путем последовательной подачи обогащенного лития на установке была продемонстрирована возможность каскадирования системы. А.А. Иванов тогда обратил все свое внимание на анализ механизмов разделения в сильно ионизированной плазме и провел физический анализ центробежного механизма, поляризационного разделения на торцах, разделения на буферном газе. Все эти работы имели целью выяснение путей повышения параметров, в так называемой плазменной центрифуге. Исходя из опыта разработок

газовой центрифуги, он подверг теоретическому анализу возможность организации циркуляции вещества в цилиндрической плазменной системе при наличии электрического поля. Нужно отметить, что плазменная разделительная система на основе пучково-плазменного взаимодействия представляет сложный объект, в котором одновременно действуют нелинейные механизмы передачи энергии в плазму, дрейфовые движения, взаимодействие со стенками объема, перенос излучения, что ограничивает возможности его анализа аналитическими методами. Поэтому А.А. Иванов еще в начале восьмидесятых годов предпринял попытки анализа разряда численными методами.

В результате успешного развития работы в восьмидесятых годах была создана серия установок СПРУТ (СПРУТ-2, СПРУТ-3). Последний вариант был создан в НПО «Красная звезда» - макет опытно-промышленной установки СПРУТ-4М. На ней уже в 1987 году были получены высокие результаты по разделению изотопов лития, и установка продемонстрировала устойчивую непрерывную работу в течение 100 часов. К сожалению, работа была остановлена, когда в стране началась перестройка и произошли грозные изменения в государственном подходе к развитию науки.

Пусть о сложном характере Иванова Андрея Акимовича напишут другие, кто близко его знал и долго с ним работал, испытав на себе эту сложность. Не признать за ним роль драйвера науки (современный язык!) не сможет никто – драйвера высокообразованного, высоко эрудированного, талантливого ученого, легко делившегося своим опытом, знаниями, личностью с молодыми физиками и возбуждавшего в них интерес к работе, физике, интерес к жизни в науке.

В 1978 году ко дню рождения Андрея Акимовича после нашего с ним разговора о ремонте его автомобиля «Жигули» я написал ему шутивное стихотворение. Привожу его здесь, и думаю, многие узнают в этой шутке его живой и энергичный образ.

Ты меня понимаешь?
Я ж простой Иванов.
В жилах южная кровь.

Ну а так - не узнаешь.
Пусть кричат дураки:
«Соловей, мол, разбойник!»
Иванов, мужики
Просто-напросто – стоик.
В рот заглянут друзья,
Поразмыслят, вспотеют.
А потом закричат: «Это я,
Я придумал идею!»
Я ж не жаден – бери,
Получи, что имею.
Только в оба смотри,
Если взять не сумеешь!
Я – профессор авто,
Я профессор по плазме.
Я и это, и то,
Все я – нет, что ли, разве?
В море плазменных волн
Точный путь указую.
Плазмохимии челн
Быстро плыть обязую.
Иванов - имярек,
Вдруг его не узнаешь.
Но и я ж человек.
Ты меня понимаешь?

Воспоминания об Андрее Иванове.

Карел Юнгвирт

Человеческая память в чем-то похожа на фотоаппарат. Снятый кадр укладывается и почти не изменяется на протяжении целых десятилетий. Таким образом, был и останется в моих воспоминаниях Андрей не только молодым талантливым физиком, но и хорошим другом, весёлым парнем и одновременно честным культурным человеком с чрезвычайно широкой шкалой интересов и знаний.

Судя по тематике его кандидатской диссертации «Динамика квазилинейной релаксации» /1967 год/, Андрей на два года старше меня, по видимому, он впервые заметил моё существование в Курчатовском институте уже в 1965 году, когда я, в рамках своей долгосрочной аспирантской стажировки в ОПИ /Отделе Плазменных Исследований/ в группе знаменитых теоретиков Михаила Александровича Леонтовича, докладывал на Т- семинаре результаты нашей совместной с А. Б. Михайловским работы «Квазилинейная трансформация волн».

Хотя и Андрей в то же время был в аспирантуре в Курчатовском институте, шансы лично познакомиться были малы, так как Андрей входил в состав теоретического отдела Д. А. Франк-Каменецкого. Но в 1968 году, во время его долгосрочной стажировки у нас, никто из пражского Института физики плазмы не мог не заметить его присутствие, несмотря на тот факт, что именно этот год своими бурными событиями нестереотипно вписался в историю и не только Чехословакии.

В течение одного - двух месяцев мы к своему удивлению стали замечать, что Андрей всё больше и больше понимает, когда мы разговариваем между собой по-чешски. Дело изумительное, ничего подобного с тех пор никому из наших зарубежных коллег кроме поляков не удавалось. Но польский язык, безусловно, намного ближе чешскому, чем русский. У Андрея был несомненно исключительный лингвистический талант. «Андрей, как это возможно» - спрашивали мы в перерыве попыток решить более серьёзные вопросы физики высокотемпературной плазмы, её высокочастотного нагрева и взаимодействия с пучками заряженных частиц. «Когда я узнал, что собираюсь в страну, где

местное население называет свой родной язык матерщиной, то мне стало ясным, что такой язык я должен выучить» - ответил Андрей. На самом деле, быть хорошо подготовленным – правило, которое Андрей соблюдал при всех своих многочисленных деятельности. И поскольку он очень интересовался протекающими в те времена общественными переменами в Чехословакии и хотел понять, что такое так называемая «Пражская весна» в действительности, он заранее изучил и грамматику чешского языка. Узнавая, таким образом, непосредственно настоящее положение дел в Чехословакии, полностью отличающееся от официальной советской пропаганды этих времён, ясно, что после нападения войск пяти «братских» стран, 21-го августа 1968 года Андрей оказался в очень опасном для его будущего положении. Чтобы помочь дорогому другу, в первую очередь надо было его убедить, что, несмотря на заранее договоренные сроки его пребывания в нашем Институте, он должен как можно быстрее уехать из Праги домой.

Достать билеты и довести Андрея с чемоданами на машине к поезду в Праге, где на каждом перекрёстке стоит танк и вокруг него сотни обиженных людей, само по себе авантюра. Но вот теперь мы уже стоим на перроне Главного пражского вокзала, Андрей в купе у окошка и мы с нетерпением ждем свистка. Про что мы ещё забыли? Чемоданы!!! «Андрей, открывай чемоданы» – ну конечно!!! Почти всё без исключения имеющееся место заполнено чешскими газетами, журналами, в том числе и сатирическими, все изданы в 1968 году и на взгляд Андрея интересные, а также ещё и официальные документы из братской страны. В Чехословакии это пока всё возможно, но за рубежом, откуда пришли войска, каждый листок этих бумаг – взрывчатка, вполне сопоставимая с местным общеизвестным событием. До ухода поезда оставалась всего лишь пара минут, но мы успели вовремя всю печать - взрывчатку вынести на перрон. Судя по нашим взаимно пересекающимся научным тематикам, трудолюбию и при имеющихся отличных дружеских отношениях с глубоким взаимным уважением друг к другу, казалось вполне нормальным, что мы оба теоретика, с теснейшей связью с экспериментами, стали бы соавторами целого ряда общих работ. Но из-за политических событий у нас с ним не было ни одной статьи.

Прошло тридцать лет и Российской Академии Наук исполняется 275 лет со дня её основания. И на банкете, наконец-то, после стольких лет снова свободно разговариваем, как будто бы вчера разошлись два коллеги и вполне неважно, что первый стал, между прочим, одним из руководителей во всём мире известного Курчатовского института, а другой, бывший аспирант, прилетел в роли вице-президента Чешской Академии Наук. И выясняется, что действительно, летом 1968 года при возвращении Андрея домой на поезде советские пограничники ничем другим, как поиском чешской прессы не интересовались. Но это уже прошлое.

Важнее, что мы могли в тот вечер к истории своего знакомства добавить, что мы оба в 90-х годах знаем, что делать для возрождения русской и чешской науки. Андрей возвращается в Курчатовский институт и в ранге заместителя директора балансирует на грани возможного, чтобы сохранить уникальный человеческий научный потенциал. А бывший зарубежный аспирант не только возглавляет класс институтов естественных наук, но и руководит группой энтузиастов Научного Центра Лазерной Плазмы PALS, в результате чего в Чешской республике уже начался строить международный лазерный комплекс ЕЛИ / **Extreme Light Infrastructure**/.

К сожалению, об этих последних событиях я уже Андрею высказать не успел. Но оба мы успели увидеть возрождение Курчатовского института, которому я от всего сердца желаю сто и сорок успешных лет в науке, счастье его сотрудникам в личной жизни и, самое важное, много таких людей, каким был Андрей Акимович Иванов.

Коротко об авторах.

Ерохин Николай Сергеевич - доктор физ.-мат. наук, профессор. В настоящее время зав. отделом ИКИ РАН.

Иванов Андрей Андреевич, сын А.А. Иванова, кандидат физ.-мат. наук. В настоящее время живет во Франции, работает в Эколь Политекник

Ильгисонис Виктор Игоревич - доктор физ.-мат. наук, профессор. В Курчатовском институте работает с 1979 г. В настоящее время главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт».

Курко Олег Владиславович - кандидат физ.-мат. наук. В Курчатовском институте работает с 1972 г. В настоящее время научный сотрудник ФТИ НИЦ «Курчатовский институт».

Лукьянов Андрей Александрович - кандидат физ.-мат. наук. В Курчатовском институте работает с 1984 г. В настоящее время старший научный сотрудник ФТИ НИЦ «Курчатовский институт».

Марта Бакал - доктор физ.-мат. наук, Эколь Политекник, Палезо, Франция.

Михайловский Анатолий Борисович - доктор физ.-мат. наук, Член корр. РАН. В Курчатовском институте работает с 1961 г. В настоящее время главный научный сотрудник ИФТ НИЦ «Курчатовский институт».

Милантьев Владимир Петрович - доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры физики РУДН.

Нюхалова Екатерина Александровна (Вострикова) - кандидат физ.-мат. наук. В Курчатовском институте работает с 2004 г. В настоящее время старший научный сотрудник ФТИ НИЦ «Курчатовский институт».

Пастухов Александр Николаевич - кандидат технических наук. В Курчатовском институте работает с 1978 г. В настоящее время зам. директора ФТИ НИЦ «Курчатовский институт».

Переславцев Александр Васильевич - кандидат физ.-мат. наук. В Курчатовском институте работал с 1975 по 1986 г., затем перешёл на работу в КБ «Салют», в 1994 г. вернулся в институт. В настоящее время - начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт».

Пивоваров Олег Николаевич - С 1985г. по 1995г. работал Главным конструктором в КБ «Салют». В настоящее время - Президент некоммерческого КЕИ (космос, энергия, информация) – фонда.

Старых Валерий Васильевич - кандидат физ.- мат. наук. В Курчатовском институте работает с 1969 г. В настоящее время - директор департамента НИЦ «Курчатовский институт».

Хрипунов Борис Иванович - кандидат физ.-мат. наук. В Курчатовском институте работает с 1969 г., в 1971 г. переходил на работу в Госкомитет по использованию атомной энергии СССР, а затем в 1977 г. вернулся в институт. В настоящее время начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт».

Карел Юнгвирт - доктор физ.-мат. наук, директор Научного Центра Лазерной Плазмы PALS, Прага, Чехия.

ФОТОАЛЬБОМ



Андрей с мамой Антониной Ивановной, 1941 год.



Выпускники школы, 1956 год (Андрей в третьем ряду второй слева).



Университетские годы, 1961 год.



А. Иванов, конец 1960-х годов.



Берн, Швейцария, 1973 год (справа налево: А.А. Иванов, Б.И. Хрипунов).



Минск, 1975 год - конференция по слабоионизованной плазме (справа налево: А.А. Иванов, В.В. Старых, В.Г. Лейман, А.И. Бабарицкий).



А.А. Иванов среди участников школы по плазмохимии, 1977 год.



Физический пуск плазмохимической установки «Спрут», 1978 г. (слева направо: Б.И. Хрипунов, А.А. Иванов, В.А. Кривцов, А.М. Удалов, Б.Б. Кадомцев).



А.А. Иванов, конец 70-х годов.



А.А. Иванов на отдыхе, Кубинка, 1989 год.



А.А. Иванов с сыном Андреем, Версаль, Франция, 2001 год.



А.А. Иванов (крайний справа) среди сотрудников лаборатории Эколь Политекник, Париж, Франция, 2003 год.



А.А. Иванов и В.И. Рыжий, университет Айзу, Япония, 2007 год.

Содержание.

Биография	3
Избранные научные труды	9
Динамика квазилинейной релаксации бесстолкновительной плазмы <i>ЖЭТФ</i> , 1966, т. 51(5), с. 1522-1534.....	11
Физика химически активной плазмы. <i>Физика плазмы</i> , 1975, т. 1(1), с. 147-159.....	26
Влияние пристеночной рекомбинации на проводимость в СПД (стационарных плазменных двигателях). <i>Plasma Phys. Control. Fusion</i> . 2002, V. 44, N. 1463-1470.	42
Список научных трудов	53
Воспоминания	63
<i>Андрей Иванов</i> . Страницы жизни А.А. Иванова.	65
<i>Н.С. Ерохин</i> . Мои встречи с А.А. Ивановым.	69
<i>Андрей Иванов</i> . Мой отец – Андрей Акимович Иванов.	71
<i>В.И. Ильгисонис</i> . Легенда физтеха, корифей «курчатника».	74
<i>О.В. Курко</i> . Воспоминания об Андрее Акимовиче Иванове.	79
<i>А.А. Лукьянов</i> . О пользе людей со сложным характером.	84
<i>Марта Бакал</i> . Воспоминания о моём друге Андрее Акимовиче Иванове.	88
<i>А.Б. Михайловский</i> . О моём многолетнем друге и выдающемся учёном Андрее Иванове.	90
<i>В.П. Милантьев</i> . Памяти Андрея Акимовича Иванова.	94
<i>Е.А. Нюхалова (Вострикова)</i> . Вспоминая А.А. Иванова.	96
<i>А.Н. Пастухов</i> . Большой ученый и учитель.	98
<i>А.В. Переславцев</i> . Учитель.	100

<i>О.Н. Пивоваров.</i> Звёздные войны профессора А. Иванова.	102
<i>В.В. Старых.</i> Как это было или история одной плазмохимической империи.	106
<i>Б.И. Хрипунов.</i> Сила притяжения.	112
<i>Карел Юнгвирт.</i> Воспоминания об Андрее Иванове.	118
Коротко об авторах.	121
Фотоальбом.	123

Ученый, учитель, друг...
Книга об Андрее Акимовиче Иванове.

Научный редактор:
д. физ.-мат. н., член корр. РАН А.Б. Михайловский.

Редакционная группа:
Л.И. Елизаров, А.Н. Пастухов, Г.В. Поволоцкая.

Подписано в печать 21.04.2014 г.
Формат 60x84/16. Печ. л. 8,5.
Тираж 50 экз. Заказ 8952.

Издательство «Тривант»
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Тривант».
142191, г. Москва, г. Троицк, м-н «В», д. 52.
Тел. 8 (495) 775-43-35, 8 (495) 851-09-67
E-mail: trovant@trtk.ru, <http://www.trovant.ru/>