

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

Обзор¹

М.К. Романовский

Разные колебания (продолжение)

В работе А.А. Веденова и др. [1] предложен оригинальный метод рассмотрения колебаний и неустойчивости слаботурбулентной плазмы. Он весьма прост для понимания и применим, когда колебания сильно различаются по величине: ВЧ-колебания представляются как квазичастицы, влияющие на движение частиц плазмы в низкочастотных колебаниях. Это позволяет просто и физически ясно описать взаимодействие ВЧ- и НЧ-колебаний, рассеяние волн частицами плазмы, взаимодействие с участием четырех квазичастиц.

¹ Продолжение. Начало обзора в ВАНТе. Сер. Термоядерный синтез, 2002—2006 гг., 2007 г., вып. 1—3.

В работе В.В. Арсенина [2] получено точное уравнение потенциальных колебаний цилиндра неоднородной плазмы, когда ларморовский радиус иона сравним с радиусом цилиндра и характерным размером неоднородности плазмы. Рассмотрены дрейфовые и циклотронные колебания и желобковая неустойчивость цилиндра с резкой границей.

В работе А.В. Тимофеева [3] исследованы колебания при трех видах распределения объемного заряда, соответствующих трем типам распределения скорости вращения плазмы: монотонное без точки изгиба (inflexion), монотонное с точкой изгиба и немонотонное. Показано, что в первом случае плазма устойчива по отношению к желобкам, во втором случае есть неустойчивость типа диатронной. Автор рассмотрел и пример немонотонного распределения скорости, а в Приложениях и ограничения на применимость теоремы Релея, связанные с тем, что конечность ларморовских радиусов в плазме играет роль вязкости в жидкости.

Дрейфовые неустойчивости

В обзорном докладе [4] Б.Б. Кадомцев отметил, что после подавления МГД-неустойчивостей наиболее опасными становятся дрейфовые (хотя автор и говорил, что будет рассматривать только тороидальные системы, но это положение имеет более общий характер. — Прим. М.Р.*). Поэтому и начнем с них: это не только наиболее опасный, но и наиболее широкий класс неустойчивостей, и неслучайно их называли еще и «универсальными». Некоторые из них характерны только для определенных конфигураций магнитных полей (например, дрейфово-конусная специфична для открытых адиабатических ловушек), и работы привязанные к определенным типам установок, рассмотрены в соответствующих разделах, а здесь только наиболее общие. Конечно, это тоже довольно условно, так как дрейфовые неустойчивости часто связаны с другими, даже МГД, например, с желобковыми.

В работе А.Б. Михайловского и А.М. Фридмана [5] рассмотрены неустойчивости, связанные с волнами альфвеновского и магнитозвукового типа в бесстолкновительной неоднородной плазме конечного давления. С волнами магнитозвукового типа связан ряд неустойчивостей, возникающих если относительный градиент температуры сравним или больше градиента плотности и они противоположны по знаку. Показано также, что ионно-температурная неустойчивость в плазме с газокINETическим давлением, превышающим магнитное, отсутствует.

Работа А.Б. Михайловского и Э.А. Пашицкого является развитием работ [7, 8] на случай более крупномасштабных возмущений с длиной волны больше переходного слоя. Неустойчивость возникает при скоростях встречных потоков v много больше тепловой скорости v_T ($v \gg v_T$), а также, если тепловой разброс скорости Δv_T сравним с относительной направленной скоростью Δu ($\Delta v_T \cong \Delta u$), но только при большом различии температур в потоках ($T_2 \gg T_1$). В работе А.Б. Михайловского [9] показано, что в неоднородной плазме возможна раскачка электронами волн типа электронного звука при $\partial \ln T / \partial \ln n > 0,9$ и альфвеновской волны при $\partial \ln Y / \partial \ln n > 4$. Если в системе с полем $H_{\min}$ время удержания плазмы $\tau_{уд}$ не превышает времени ион-ионных столкновений τ_{ii} ($\tau_{уд} \leq \tau_{ii}$), то рассмотренная неустойчивость может превалировать (так как $\tau_{ee} \ll \tau_{ii}$).

Работа А.А. Иванова и др. [18] является развитием работы [11], показано, что в квазилинейном приближении устойчивость не достигается, а спектр неустойчивости смещается в сторону более коротких длин волн. Рассмотрены потенциальные дрейфовые волны при $T_e \gg T_i$, установлен закон изменения во времени волнового числа полета, остающегося узким. Показано, что нелинейность инкремента проявляется в том, что возникшее возмущение с данным волновым вектором слабо влияет на коротковолновую часть спектра, но подавляет его длинноволновую часть и это справедливо для других дрейфовых неустойчивостей, в частности при $T_e = T_i$.

В работе А.Б. Михайловского и А.М. Фридмана [12] (развитие работы [5]) показано, что волны типа альфвеновских в плазме конечного давления затухают при любых значениях $\partial \ln T / \partial \ln n$ если их частота достаточно велика $|\omega| > |k_z| v_{Ti}$. В плазме с $\beta < 1$ в ограниченном интервале градиента температуры могут существовать волны с $\omega < |k_z| v_{Ti}$, а в плазме с $\beta > 1$ такие волны существуют при любых

* М.Р. — Михаил Романовский.

$\partial \ln T / \partial \ln n$ причем в области отрицательных градиентов температуры развивается неустойчивость. В работе О.П. Погуце [13] показано, что в системах, обладающих широм θ одной из наиболее опасных является температурная дрейфовая неустойчивость, локализуемая в области x_i , не превышающей $x_i \leq \rho_i / \theta$. Наиболее благоприятные условия ее развития $T_e \sim T_i$; $\partial \ln T / \partial \ln n \gg 1$, при этом $\omega < \gamma < k_{\parallel} v_i \cong \omega_{Ti}^*$ (не общепринятая величина — дрейфовая частота по температуре dT_i/dr). В неизотермичной плазме эта неустойчивость стабилизируется при $\theta \gg T_e T_i / (T_e^2 + T_i^2)$. Максимальный коэффициент с широм $D \sim \rho_i^2 v_i / \theta a$ ($a < 1$, численный множитель).

В работе ВИ Петвиашвили [14] показано, что крутизна фронта дрейфовой волны растет со временем до состояния, когда становится существенной инерция ионов поперек магнитного поля. Тогда волна не слишком большой амплитуды переходит в стационарное состояние, что может привести к неустойчивости и сильной турбулентии. В работе того же автора [15] показано, что при наличии градиента скорости плазменного сгустка поперечного магнитному полю возможна раскачка ионно-электронных дрейфовых колебаний. Эти колебания могут влиять на устойчивость сгустков. В работе В.Д. Вдовина и др. [16] изучали шумы неоднородной бестоковой плазмы, создаваемой В.Ч. разрядом и непрерывно вытекающей в измерительный объем (внутри катушек 4 на рис. 1).

Авторы установили, что наблюдаемая неустойчивость по ряду признаков является дрейфово-диссипативной и во многом схожа с универсальной неустойчивостью, наблюдаемой в термической плазме щелочных металлов.

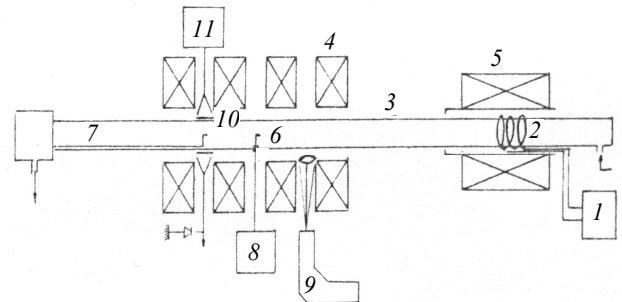


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — ВЧ-генератор; 2 — ВЧ-контур; 3 — стеклянная труба; 4 — катушки основного магнитного поля; 5 — катушки вспомогательного магнитного поля; 6 — радиальный подвижной электрический зонд; 7 — продольный подвижной электрический зонд; 8 — анализатор спектра; 9 — монохроматор; 10 — интерферометр Фабри—Перо с $\lambda = 8$ мм, 11 — сигнал-генератор 8 мм сигнала

Желобковые неустойчивости и способы их стабилизации

Эти неустойчивости теоретики рассматривали еще до рассекречивания работ по термоядерному синтезу. Принцип «Min B» математически у нас сформулировал Б.Б. Кадомцев [17] в 1957 г. После экспериментального доказательства его справедливости М.С. Иоффе с сотрудниками [18] по вопросам конвективной неустойчивости был посвящен ряд и теоретических и экспериментальных работ, например: теоретические [19—21 и др., всего более десяти], экспериментальные [22—24] разумеется, в теоретические работы включены и те, где рассматриваются не только одни, «чисто» конвективные. Выполнение принципа «Min B» обеспечило подавление желобковой МГД-неустойчивости и, вероятно поэтому интерес к ним несколько уменьшился.

В работе А.В. Тимофеева [25] рассмотрено влияние резонансов между волной и невозмущенным движением плазмы в неоднородном магнитном поле. Показано, что наличие резонансов, (когда фазовая скорость волны совпадает со скоростью ларморовского дрейфа ионов) стабилизирует плазму, так что при тщательном подборе характеристик резонансов можно подавить все моды желобковых колебаний. В присутствии электрического поля возникают резонансы второго типа — при совпадении фазовой скорости волны со скоростью электрического дрейфа плазмы. В этом случае колебания могут затухать или нарастать. Работа того же автора [26] развивает работу [25], где рассмотрены резонансы второго рода с учетом ларморовского радиуса ионов ρ_i (хотя и много меньшего, чем дебаевский радиус r_D). Показано, что при линейном изменении напряженности достаточно большого стационарного электрического поля ($E_0'' = 0$) колебания отсутствуют, а при $E_0'' \neq 0$ инкремент желобковых колебаний уменьшается с ростом E_0'' .

В работе В.В. Арсенина [27] рассмотрена желобковая неустойчивость цилиндра плазмы, в которой переходный слой плазма—вакуум составляет два ларморовских радиуса иона ρ_i . Показано, что мода

$m = 1$ не стабилизируется даже при ларморовском радиусе, сравнимым с радиусом системы. В такой сильно неоднородной плазме большое r_i может приводить к неустойчивости высших мод.

Работа А.В. Тимофеева [28] продолжает работы того же автора [25, 26] и показано, что при достаточно большой величине пространственного заряда и монотонном распределении электрического поля собственные колебания отсутствуют. Это применимо и к локализованным внутри плазмы мелкомасштабным колебаниям.

В работе В.В. Арсенина [29] показано, что желобковая неустойчивость, вызванная кривизной магнитных силовых линий в разреженной плазме ($\omega_{0i} \ll \omega_{Hi}$) может быть подавлена достаточно глубокой модуляцией этого поля на частоте, превышающей ω_{Hi} .

В работе А.В. Тимофеева [30] показано обеспечение желобковых колебаний эффектом конечного ларморовского радиуса, (без обычно применяемого, разложения по малому ларморовскому радиусу).

В работе В.Д. Шафранова и Э.И. Юрченко [31] показано углубление магнитной ямы, обусловленное балонным (из-за давления плазмы. — Прим. М.Р.) растяжением плазменного шнура, с точностью, до квадрата параметра эллиптичности $\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1 + l_2}$, где l_1 и l_2 — полуоси эллипса компенсирующее балонную неустойчивость. Даны оценки критического давления плазмы для системы с винтовой и осевой симметрией и для двухзаходного стелларатора.

В работе В.В. Арсенина и А.В. Тимофеева [32] показано, что в адиабатических ловушках область желобковых неустойчивостей расширяется при учете: взаимодействие колебаний частиц между пробками с желобковыми колебаниями, турбулентного трения и потерь частиц. При учете этих факторов желобковая неустойчивость может развиваться и в системах, то есть

В работе В.А. Ранцева-Каринова и Б.А. Трубникова [33] рассмотрены конвективно-устойчивые магнитные поля и предложена система периодически чередующихся проводников с токами встречных направлений, повернутых в каждой последующей паре на 90° . Токи текут ортогонально к однородному магнитному полю.

Циклотронные колебания и неустойчивость

Циклотронная неустойчивость для адиабатических ловушек, так как удержание плазмы в них возможно только при условии, что энергия поперечного (по отношению к магнитному полю) движения много больше энергии продольного движения. В 1963—1965 гг. этой неустойчивости было посвящено несколько работ (см. [34—40]), но интерес к ней не пропал.

Начнем с обзора: А.В. Тимофеев и В.И. Пистуневич [41]; список литературы — 32 наименования, из них 21 отечественная работа и из последних 12 работ сотрудников ИАЭ, правда далеко не все точно по ионно-циклотронным колебаниям. Авторы рассматривают однородную плазму низкого давления в линейном приближении и предположениях о распределении: анизотропном максвелловском и в виде δ -функции. Обзор содержит 7 параграфов: «Введение. Классификация неустойчивостей»; «Основные уравнения»; «Устойчивость плазмы с анизотропным максвелловским распределением ионов»; «Устойчивость плазмы с распределением ионов по скоростям в виде δ -функции»; «Устойчивость анизотропной плазмы при наличии холодных ионов»; «Устойчивость плазмы с неравновесным распределением электронов по скоростям»; «Заключение. Основные результаты. Приложение». Результаты работы наглядно показаны на рис. 2, хотя и в очень сжатой форме, например, левая заштрихованная

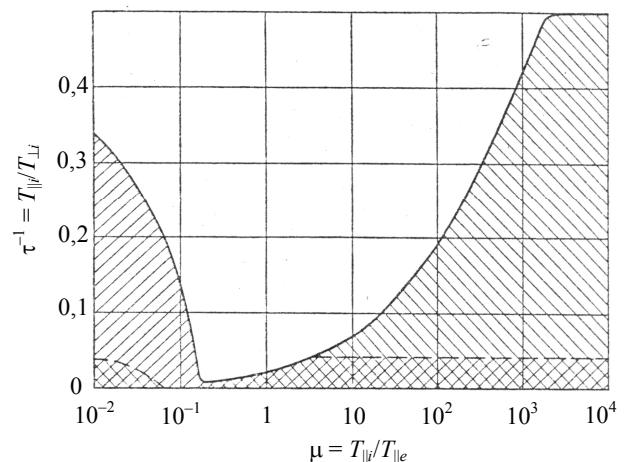


Рис. 2. Область неустойчивости анизотропной максвелловской плазмы. Двойной штриховкой выделены области неустойчивости колебаний с аномальной дисперсией

область графика — «медленные» ионно-звуковые колебания, внутри нее внизу (двойная штриховка) диссипативная неустойчивость; правая заштрихованная область — «быстрые» электронные ленгмюровские, внутри внизу (двойная штриховка) — неустойчивости гидродинамического типа (их энергия равна нулю). Авторы подробно рассматривают условия развития неустойчивостей, вычисляют инкременты и т.д.

В работе А.В. Тимофеева [42] показано, что наблюдаемый в работе [43] взрывной характер излучения на ионно-циклотронной частоте можно связать с развитием циклотронных колебаний с отрицательной энергией, появляющихся в анизотропной плазме с распределением частиц по скоростям далеким от равновесного [44, 45].

В работе Л.В. Михайловской [46], показано, что при учете кривизны магнитного поля возникает новый вид ионно-циклотронной неустойчивости плазмы с моноэнергичными ионами.

В работе В.И. Петвиашвили [47] рассмотрены ионно-циклотронные колебания большой амплитуды (нелинейное рассмотрение бесконечной однородной плазмы с потенциальными квазинейтральными колебаниями). Показано, что возможная плотность энергии таких колебаний ограничена сверху, так как рост энергии быстрых колебаний при больших амплитудах задерживается резонансным поглощением на ионах (нагрев), фронт энергии медленных волн прекращается из-за конечной ширины потенциальной ямы, так, что ионно-циклотронные колебания не всегда нагревают ионы.

В работе А.В. Бортникова и др. [48] изучали порог возникновения ионно-циклотронной неустойчивости в ловушке «АС», специально дооборудованной для этих опытов (рис. 3). Определены критические значения плотности возникновения ионно-циклотронной неустойчивости при двух значениях напряженности магнитного поля, согласующиеся с теоретической оценкой. При захвате плазмы в поле ловушечной конфигурации ионно-циклотронная неустойчивость быстро затухает, но проявляется желобковая.

В работе Ю.Т. Байбородова и др. [49] изучали ионно-циклотронную неустойчивость в установке ПР-5 с «Min B» [50, 51]. Во время разпада наблюдалась одна (реже две—три) вспышки неустойчивости, каждая 30—40 мкс, причем потери плазмы достигали 50—80% начальной плотности. Локализованы места наибольших потерь поперек магнитного поля и указано, что сравнимы потери вдоль и поперек поля. Ионно-циклотронная частота соответствует напряженности магнитного поля в центре ловушки. Измерены напряженности переменных магнитного ($\sim 10^{-3}$ Э) и электрического (~ 50 — 70 В/см) полей на стенке камеры в центральном сечении ловушки. Длина волны электрического поля $\lambda_{\perp}$ существенно больше теоретически предсказанной для однородного поля.

В работе В.И. Пистуневича и Д.Д. Рютова [52] показано, что в плазменном сгустке, полученном в импульсном плазменном инжекторе, в определенных условиях движения его вдоль однородного магнитного поля возникают ионно-циклотронные колебания. Эти колебания приводят к «перекачки» энергии из тепловой поперечной в продольную и авторы дают практическую рекомендацию: мишени для перезарядки не размещать вблизи инжектора.

В работе В.В. Аликаева и др. [53] наблюдали электронно-циклотронную неустойчивость плазмы с горячими электронами ($T_e \cong 20$ — 30 кэВ) в адиабатической ловушке. Плазму нагревали импульсным СВЧ-полем с длиной волны 10 см. В работе А.В. Бортникова и др. [54], проведенной на установке «АС» [55] установлена линейная зависимость порога ионно-циклотронной неустойчивости от плотности плазмы (тока быстрых ионов); при неустойчивости наблюден выброс быстрых ионов на стенки камеры, расширение их углового распределения и, соответственно, уход в пробки.

Работа В.В. Аликаева и др. [56], видимо, является содержанием доклада авторов на конференции в Стокгольме [53]: подробно описаны установка, диагностика, процесс нагрева электронов, проведение экспериментов, приведено много графиков и осциллограмм, в теоретической части рассмотрены дисперсионные уравнения для колебаний вблизи электронно-циклотронного резонанса.

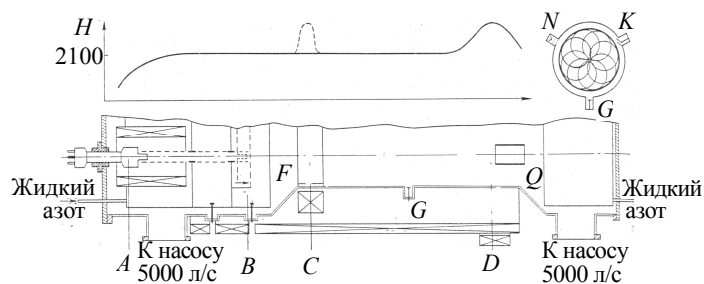


Рис. 3. Схема установки: A — источник ионов; B — ускоряющие электроды; C — квазистационарная магнитная пробка; D — стационарная магнитная пробка; G — антенна; Q — токоприемник; F — цилиндр, ограничивающий радиальные размеры плазмы; K — токоприемник быстрых атомов; N — детектор нейтральных частиц

Турбулентность

Турбулентный нагрев плазмы начнем с обзора Е.К. Завойского и Л.И. Рудакова [57], хотя это 1967 год. Список литературы 33 наименования, из них 28 отечественных работ, в том числе 16 работ сотрудников ИАЭ: изучать его начали в нашем институте.

В обзоре два раздела: «Нелинейная теория неустойчивости тока в плазме», «Эксперименты по турбулентному нагреву и исследованию токовых неустойчивостей» и «Заключение». Авторы начинают с рассмотрения ленгмюровских и ионно-звуковых колебаний, условий их возбуждения и существования. При наличии достаточно плотного или моно энергичного пучка на функции распределения электронов по скорости вдоль пучка есть область с положительной производной $\partial f / \partial v > 0$, что приводит к неустойчивости, раскачке колебаний, турбулентности. Авторы показывают, что упругое рассеяние заряженных частиц на колебаниях и упругое (кулоновское) рассеяние электронов на ионах одинаково зависят от скорости частиц ($\sim v^{-3}$), но частота рассеяния на колебаниях $\nu_{\text{эф}}$ может на много порядков превышать частоту кулоновского рассеяния $\nu_{\text{кул}}$: их соотношение $\nu_{\text{эф}} / \nu_{\text{кул}} \cong n r_d^3$ (n — плотность, r_d — дебаевский радиус) в горячей плазме очень велико. Затем авторы показывают, что в неизотермической плазме ($T_e \gg T_i$) сопротивление весьма велико из-за ионно-звуковых колебаний на которых рассеиваются, теряя импульс, электроны, а энергию колебаний поглощают ионы при рассеянии на них ионно-звуковых колебаний; однако и рост числа и нагрев резонансных ионов тоже может быть не малым. В конце теоретического раздела авторы рассматривают роль «убегающих» электронов. В обзоре экспериментальных работ авторы рассмотрели отдельно замкнутые и открытые ловушки, широко используя работы [58—64]. При этом в замкнутых ловушках особое внимание уделили работе [60], (даже привели чертеж и описание установки, и, естественно, полученные результаты), а в открытых ловушках [64]; обе работы коллектива работали сами авторы. Обсуждены и результаты работ, проведенных в ХФТИ, НИВИ и некоторых зарубежных. Интересно, что кратко описана еще не опубликованная работа на установке «Вихрь-2».

Работа Б.А. Демидова и С.Д. Фанченко [58] является развитием [65, 66], проведена на той же установке. Определены частотные спектры собственного излучения плазмы, приведены графики (гистограммы) комбинационного рассеяния, оценена степень турбулентности плазмы и характерный вектор плазменных колебаний $\mathbf{K}_0$, находящийся в разумном соответствии с расчетами [65].

В работе Д.Н. Лина и В.А. Скорюпина [63] изучали шумы плазмы на установке, описанной в [67, 59]. Установлена зависимость интенсивности излучения от величины и распределения продольного электрического поля; зависимость спектра излучения от плотности плазмы; оценена степень турбулентности. Авторы считали, что в начальной стадии разряда развивается токовая неустойчивость, затем по мере нагрева проявляется только ионно-звуковая неустойчивость.

Работа В.А. Скорюпина [68] выполнена на той же установке и посвящена изучению прохождения слабого ВЧ-сигнала ($f = 3 \cdot 10^8$ Гц), излучаемого специальным витком, охватывающим столб разряда; сигнал принимался миниатюрным магнитным зондом, размещенным на оси разряда точно под излучающим витком. Установлено, что реальная толщина скин-слоя турбулентной плазмы больше теоретической в 16 раз и в 6 раз больше диссипативного скин-слоя. Вероятная причина наблюдаемого увеличения скин-слоя перенос зондирующего ВЧ-сигнала ленгмюровскими колебаниями.

В работе Е.К. Завойского и др. [69] на пробкотроне ТН-4 измеряли одновременно энергию E и импульс P -потока нейтронов перезарядки с помощью специального конденсаторного микрофона. Установлено, что случай усиленного нагрева объясним линейным затуханием Ландау при скорости ионов, большей скорости звука.

В работе А.В. Тимофеева [70] предложен способ вычисления по порядку величины коэффициента диффузии и силы трения в турбулентной плазме. Автор рассматривает турбулентность, возникающую в анизотропной плазме вследствие циклотронной неустойчивости. Получено выражение для коэффициента аномальной диффузии.

В работе С.Д. Фанченко и др. [71, 72] изучали турбулентный нагрев в тороидальной установке с «остроконечной» геометрией магнитных полей (катушки включены навстречу, установка «Вихрь-2», рис. 4). Холодную плазму создавали 20 титановыми инжекторами ($10^{11} \leq n_0 \leq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), ВЧ-нагрев осуществляли

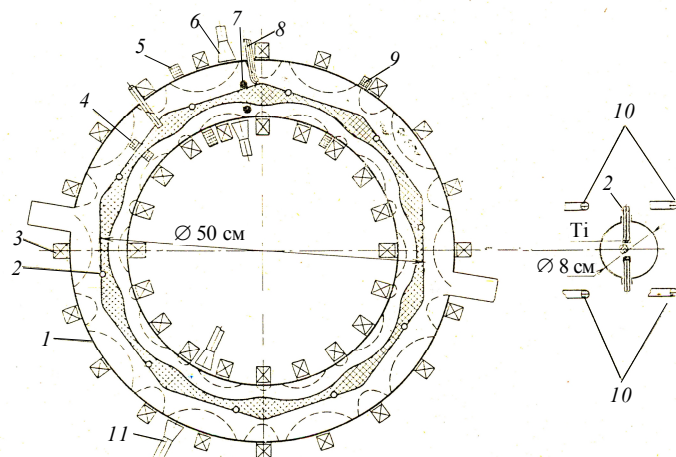


Рис. 4. Схема экспериментальной установки Вихрь-2: 1 — кварцевая разрядная камера; 2 — титаново-гибридный плазменный инжектор; 3 — катушка квазистационарного магнитного поля, одна из 20 шт.; 4 — внутренний пояс Роговского; 5 — внешний пояс Роговского; 6, 11 — антенны для СВЧ-диагностики; 7 — пятивитковый внутренний диамагнитный зонд; 8 — двойной ленгмюровский зонд для определения T_{e0} ; 9 — внешний диамагнитный зонд; 10 — витки, создающие электрическое поле обхода; — магнитные силовые линии; заштрихованная область, где поле имеет конфигурацию гофрированного тора. Максимальная напряженность квазистационарного магнитного поля 15 кЭ

индукционно, пропуская разряд по четырем симметричным относительно оси тора и идущим вдоль магнитного поля стержням. Изучались послесвечения разряда. Получено $n\tau \cong (5-7)10^{15} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$, время удержания — несколько мкс.

В работе М.В. Бабыкина [73] описаны результаты опытов по турбулентному нагреву плазмы током большой плотности, проходящим сквозь плазму вдоль магнитного поля адиабатической ловушки. Установлено возрастание нагрева с увеличением магнитного поля, наблюдалось излучение в диапазоне $3 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}$, интенсивность которого зависит от напряженности электрического поля и распределения ее вдоль столба плазмы. Теоретически рассмотрено влияние гофрировки магнитного поля. Излучали турбулентный нагрев в тороидальной системе с остроконечной геометрией магнитного поля у стенок (picket-fence), прикладывая электрическое поле больше критического по Драйсеру при плотности $n = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Установлено, что плазма удерживается большее время, чем период тороидального дрейфа.

В работе М.В. Бабыкина [74] рассмотрен случай турбулентного нагрева плазмы при аннигиляции встречных магнитных полей. Эту работу, пожалуй, можно считать крайне сжатым обзором: список трудов, на которые в тексте ссылается автор, 43 работы, из них отечественных 25, а работ сотрудников ИАЭ — 13. Однако это и не совсем обзор, так как автор ссылается на теоретические и экспериментальные работы, подтверждающие высказанное им положение, или называет экспериментально обнаруженный эффект, явление и объясняет его со своей точки зрения, иногда ссылаясь на другие работы. Нагрев плазмы при аннигиляции встречных магнитных полей характерен для θ -пинчей, с них автор и начинается. Затем привлекает работы по нагреву магнитным звуком, ударной волной, рассматривает возможные неустойчивости, дает конкретные рекомендации по эффективному использованию диффузии встречных полей для нагрева плазмы.

В работе В.И. Арефьева и др. [75] теоретически показано, что ток, текущий в плазме, в опытах работы [76] может быть причиной неустойчивости, определявшей турбулентный нагрев. Вычисленные ионная температура и декремент затухания хорошо совпали с экспериментальными.

Работа Ю.Г. Калинина и др. [77] продолжает [58, 63, 64]. Авторы изучали собственное электромагнитное излучение турбулентной плазмы на длинах волн $\lambda = 4, 6, 8, 10$ и 12 см и комбинационное рассеяние внешнего излучения на $\lambda = 3 \text{ см}$. Оценена плотность энергии ленгмюровских колебаний $W_e \cong 10^{12} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$, ионно-звуковых колебаний $W_i \cong 6 \cdot 10^{11} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$ и характерный волновой вектор, по порядку величины совпавший с дебаевским. W_{Hi}

В работе Б.И. Арефьева [78] рассмотрена неустойчивость тока при $T_i \gg T_e$ и показано, что при этом возбуждаются колебания в области $W_{Hi} \ll W \ll W_{He}$. Получено уравнение скорости нагрева ионов, рассмотрено аномальное затухание МГД-волны. Проведено краткое сравнение с экспериментом [76] и указано, что более детально оно проведено в [75].

Работа Е.К. Завойского и др. [79] является по существу обзором теоретических и экспериментальных работ по турбулентному нагреву (список литературы 35 наименований, из них 24 отечественных). Даны ссылки на [58, 60, 61, 63—66, 80—84].

Пучки в плазме

Рассмотрение работ по взаимодействию неоднородных пучков с плазмой следует начать с работы А.Б. Михайловского [85], являющейся кратким обзором (по состоянию на лето 1965 г.) пятнадцати основных таких работ. Автор подчеркивает, что для конвективного механизма раскачки пучка существенны длинные вдоль магнитного поля волны ($k_z/k_1 \ll 1$) и что в таких колебаниях существенно участие ионов. Затем автор рассматривает «неустойчивости медленного пучка ($v < \omega_{Hi}/k_z$)», «неустойчивости быстрого пучка ($v > \omega_{Hi}/k_z$)» и отмечает, что наблюдавшиеся в работах [86—89] аномальные эффекты, видимо, можно связать с конвективным механизмом раскачки колебаний. Еще две теоретические работы А.Б. Михайловского и Э.А. Пашицкого [90] и А.Б. Михайловского и К. Юнгвирта [91] посвящены роли конвективных эффектов в раскачке ионных [90] и электронных [91] колебаний плазмы. В работе [90] показано, что неоднородные по радиусу ($\delta f_0/\delta r \neq 0$) электронные пучки в однородной плазме могут раскачивать многие ветви собственных колебаний плазмы: альфвеновские (четыре ветви), ионно-циклотронные, низкочастотный и высокочастотный ионный звук, ленгмюровские ионно-электронные, гибридные (две ветви). В работе приведены две очень полезные экспериментаторам таблицы. Работа [91] несколько уже: показано, что возбуждения электронных аксиально-симметричных и неаксиально-симметричных колебаний могут определяться различающимися закономерностями. Рассмотрен случай раскачки колебаний при $\partial f_0/\partial v_z \leq 0$ и даже «пучком» с максвелловским распределением по скоростям, т.е. примесью горячей плазмы. В экспериментальной работе М.В. Незлина и др. [92] изучали колебания, содержащие ряд гармоник, возникающие в плазме при прохождении пучка электронов. Схема установки показана на рис. 5.

Были получены спектры ВЧ-колебаний тока на анод и игольчатый зонд, зависимости промежутков между выделенными частотами Δf от скорости первичных электронов, от обратной длины пучка, зависимости амплитуд колебаний на зонде от силы тока, от расстояния зонда (7 на рис. 5), от катода и так далее. Проведено весьма подробное обсуждение результатов, причем для сравнения с теорией А.Е. Бажановой на ЭВМ был рассчитан частотный спектр колебаний (в расчете реальный спектр был заменен на прямоугольный и обоснована такая замена), хорошо совпавший с экспериментальным — с поправочными постоянными коэффициентами точки легли на расчетные прямые. Авторы пришли к выводу, что наблюдается «обычная» пучковая неустойчивость в системе ограниченной длины. Повышение плотности плазмы (путем повышения давления) смещает максимум амплитуды колебаний в сторону существенно больших частот, что, «по-видимому, является выражением тенденции к постепенному переходу рассматриваемых колебаний в ленгмюровские».

В работе А.А. Иванова и Л.И. Рудакова [93] рассмотрена квазилинейная релаксация бесстолкновительной плазмы, возмущенной слабым пучком электронов со скоростью существенно больше тепловой. Определены функция распределения и спектр ленгмюровских колебаний при стационарной инжекции пучка. Авторы отметили: «Качественная картина квазилинейной релаксации, по-видимому, не меняется и в случае плотных пучков».

В работе В.М. Костина и А.В. Тимофеева [94] показано, что поток электронов с линейным профилем скорости (в направлении, перпендикулярном скорости) в сильном продольном магнитном поле устойчив.

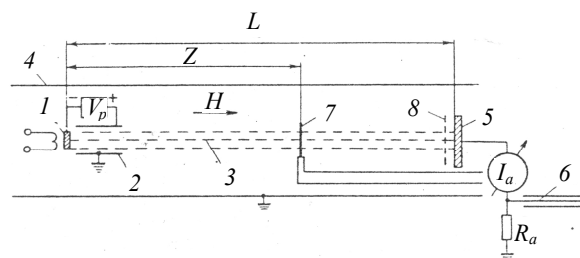


Рис. 5. Экспериментальная установка: 1 — катод; 2 — ускоряющий электрод («разрядная камера»); 3 — электронный пучок; 4 — вакуумная камера; 5 — подвижный анод (коллектор пучка); R_a — измерительное сопротивление (13 Ом); 6 — измерительный кабель; 7 — игольчатый зонд; 8 — сетка

Работа М.В. Незлина и А.М. Солнцева [95] развивает работы [88, 92]. Исследованы механизм ограничения тока электронного пучка и значения предельных токов «срыва». Схема установки показана на рис. 6. Диаметр пучка $2a = 1$ см, диаметр цилиндра $2R_0 = 30$ см, длина пучка (меняли путем перемещения анода)

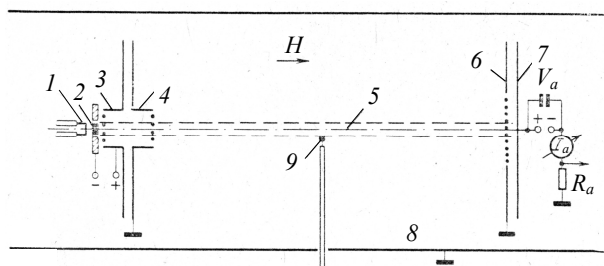


Рис. 6. Экспериментальная установка: 1 — нить накала; 2 — катод; 3, 4, 6 — диафрагмы; 7 — анод; 8 — вакуумная камера; 9 — зонд

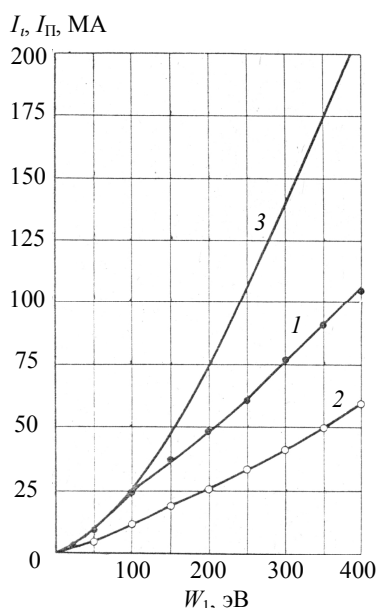


Рис. 7. Зависимость предельного тока от энергии электронов пучка в случае $2R_0 = 10$ см: 1 — $H = 4000$ Э; 2 — $H = 600$ Э; 3 — теория Пирса; $L = 100$ см

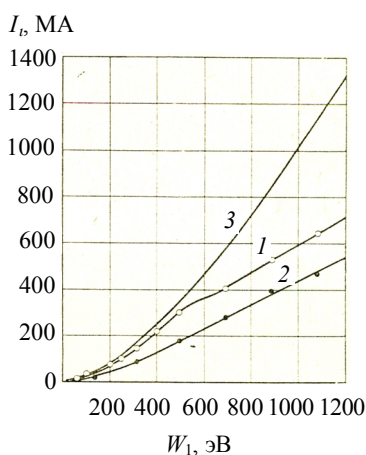


Рис. 8. Зависимость предельного тока от энергии электронов пучка в случае $2R_0 = 6$ см: 1 — $H = 5200$ Э; 2 — $H = 1200$ Э; 3 — теория Пирса; $L = 10$ см

$L = 5—150$ см, постоянное магнитное поле $H = 100—8000$ Э, давление остаточного газа $p = (1—2)10^{-6}$ торр.

Диагностика в основном та же, что и в указанных работах. Работа выполнена очень аккуратно, изучены предельные токи и ион-электронные колебания. При обсуждении экспериментальных результатов авторы широко используют сравнение с теорией (это хорошо видно и на рис. 7, 8) и приходят к выводу, что причиной ограничения (срыва) в изучаемом случае являются аксиально-симметричные ион-электронные колебания неоднородной «пучковой плазмы», а критические токи возбуждения и зависимости их от скорости пучка и напряженности магнитного поля правильно описываются теорией.

В работе М.В. Незлина и др. [96] проведена экспериментальная проверка линейной теории неустойчивости моноэнергичного пучка электронов в плазме путем, в основном, измерения порогов неустойчивостей. В определенном смысле это существенное развитие [92], где описано изучение только электронной неустойчивости. Работа [96] проведена на установке, описанной в [95], с дополнительными четырьмя зондами, один из которых мог перемещаться вдоль пучка. Изучены электрон-ионная пучковая неустойчивость, дрейфово-пучковая неустойчивость и ионный звук в

неоднородной плазме. Авторы весьма убедительно анализируют свои эксперименты, сравнивают их с другими (теоретическими и экспериментальными работами — список литературы 23 названия) и приходят к выводу: «Полученные в данной работе результаты являются хорошим подтверждением существующей линейной теории пучковых неустойчивостей».

Работа М.В. Незлина [97] проведена на установке, описанной в работе [98], и с той же диагностикой. Показано, что неустойчивость, обуславливающая нагрев ионов и образование виртуального катода (срыв тока), имеет трехступенчатый характер: первая ступень связана с центробежной желобковой неустойчивостью плазмы при вращении ее в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях ($\mathbf{E}$ — поле объемного заряда), вторая ступень с кинетической, а третья с гидродинамической раскачкой дрейфово-пучковой неустойчивости [99, 100].

Большая работа М.В. Незлина [101] (20 страниц) посвящена колебаниям и неустойчивости ионного пучка, распространяющегося в объеме с заряженным газом, и является обзором работ по этому вопросу, в свое время очень актуальному для электромагнитного метода разделения изотопов. В середине 1950-х годов автором на заводе была проведена большая серия экспериментов по выяснению причин возникновения неустойчивости пучка и путей ее подавления, но в то время все работы были секретными, так что первая публикация автора (весьма неполная) появилась в 1959 г., вторая в 1960 г. В [101] изложена история развития исследований, рассмотрены колебания в источнике, их усиление в пучке, механизм гене-

рации колебаний в пучке (во вторичной плазме), методы компенсации объемного заряда в ионном пучке. Статья хорошо иллюстрирована графиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веденов А.А., Гордеев А.В., Рудаков Л.И. Колебания и неустойчивости слабо турбулентной плазмы. — *Plasma Physics*, 1968, т. 9, вып. 6, с. 719.
2. Арсенин В.В. О колебаниях цилиндра неоднородной плазмы. — *ЖТФ*, 1967, т. 37, вып. 4, с. 607.
3. Тимофеев А.В. Воздействие электрического поля на желобковые колебания заряженной плазмы. — Там же, 1968, т. 10, вып. 3, с. 235.
4. Кадомцев Б.Б. Неустойчивость плазмы и управляемые термоядерные реакции. — *УФН*, 1967, т. 91, вып. 3, с. 381.
5. Михайловский А.Б., Фридман А.М. Дрейфовые волны в плазме конечного давления. — *ЖЭТФ*, 1966, т. 51, вып. 5, с. 1430.
6. Михайловский А.Б., Пашицкий Э.А. Неустойчивость относительного движения пространственно разделенных электронных потоков в магнитном поле. — *ЖТФ*, 1966, т. 36, вып. 10, с. 1731.
7. Михайловский А.Б., Рухадзе А.А. О неустойчивости электронных волн в неоднородных плазменных потоках. — Там же, 1965, т. 35, вып. 12, с. 2743.
8. Михайловский А.Б., Пашицкий Э.А. Высокочастотная дрейфовая неустойчивость плазмы. — *ДАН*, 1965, т. 165, вып. 4, с. 796.
9. Михайловский А.Б. Электронная температурная неустойчивость неоднородной плазмы. — *ЖТФ*, 1967, т. 37, вып. 8, с. 1365.
10. Иванов А.А., Маркеев Б.М., Рудаков Л.И. О динамике квазилинейной релаксации в неустойчивой неоднородной плазме. — *ЖЭТФ*, 1967, т. 52, вып. 2, с. 594.
11. Галеев А.А., Рудаков Л.И. Нелинейная теория дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы в магнитном поле. — Там же, 1965, т. 45, вып. 3, с. 647.
12. Михайловский А.Б., Фридман А.М. Резонансное взаимодействие с частицами волн альфвеновского типа в неоднородной плазме конечного давления. — *ЖТФ*, 1967, т. 37, вып. 10, с. 1782.
13. Погуце О.П. Температурная дрейфовая неустойчивость плазмы со скошенными силовыми линиями. — *ЖЭТФ*, 1967, т. 52, вып. 3, с. 759.
14. Петвиашвили В.И. О нелинейных дрейфовых волнах в плазме. — *ДАН*, 1967, т. 174, № 1, с. 67.
15. Петвиашвили В.И. Неустойчивость неоднородного течения плазмы вдоль магнитного поля. — *ЖТФ*, 1967, т. 37, вып. 1, с. 206.
16. Вдовин В.Л., Русанов Д.А., Франк-Каменецкий Д.А. Электрические шумы плазмы стационарного ВЧ-разряда в магнитном поле. — *Ядерный синтез*, 1966, т. 6, № 3, с. 169.
17. Кадомцев Б.Б. О гидродинамике плазмы низкого давления. — В сб.: *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций*. Т. IV. — М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 16.
18. Готт Ю.В., Иоффе М.С., Тельковский В.Г. Некоторые новые результаты по удержанию плазмы в магнитной ловушке. — *Ядерный синтез*. 1962, ч. 3, с. 1045.
19. Шафранов В.Д. О классическом тороидальном плазменном шнуре. — *Атомная энергия*, 1965, т. 19, № 2, с. 120.
20. Михайловский А.Б. Конвективная неустойчивость и эффект стабилизации в разреженной высокотемпературной плазме. — *ЖЭТФ*, 1962, т. 43, вып. 8, с. 509.
21. Рудаков Л.И. Некоторые вопросы нелинейной теории колебаний неоднородной плазмы. — Там же, 1965, т. 4, вып. 5, с. 1372.
22. Байбородов Ю.Т., Иоффе М.С., Петров В.М., Соболев Р.И. Адиабатическая ловушка с комбинированным магнитным полем. — *Атомная энергия*, 1963, т. 14, вып. 5, с. 443.
23. Иоффе М.С., Соболев Р.И. Удержание плазмы в ловушке с комбинированным магнитным полем. — Там же, 1964, т. 17, вып. 5, с. 366.
24. Бортников А.В., Бревнов Н.Н., Жуковский В.Г., Романовский М.К. Адиабатическое сжатие плазмы с горячими ионами (описание установки и первые опыты). — Там же, 1965, т. 18, вып. 3, с. 256.
25. Тимофеев А.В. Влияние резонансов между волной и невозмущенным движением плазмы на устойчивость желобковых колебаний. — *Ядерный синтез*, 1966, т. 6, вып. 2, с. 93.
26. Тимофеев А.В. О желобковых колебаниях разреженной плазмы при наличии некомпенсированного пространственного заряда. — *ЖТФ*, 1966, т. 36, вып. 10, с. 1787.
27. Арсенин В.В. О желобковой неустойчивости цилиндра сильно неоднородной разреженной плазмы. — *ЖЭТФ*, 1966, т. 52, вып. 1, с. 218.
28. Тимофеев А.В. Желобковые колебания разреженной плазмы с некомпенсированным пространственным зарядом II. — *ЖТФ*, 1968, т. 38, вып. 1, с. 14.
29. Арсенин В.В. Об устойчивости желобковых возмущений цилиндра разреженной неоднородной плазмы в присутствии высокочастотного электромагнитного поля. — Там же, вып. 3, с. 453.
30. Тимофеев А.В. О резонансном взаимодействии желобковых колебаний с ларморовским дрейфом ионов. — *Ядерный синтез*, 1968, т. 8, вып. 2, с. 99.
31. Шафранов В.Д., Юрченко Э.И. Влияние балонных эффектов на устойчивость плазмы в замкнутых системах. — Там же, вып. 4, с. 329.
32. Арсенин В.В., Тимофеев А.В. О влиянии диссипативных процессов на желобковые колебания. — *ЖТФ*, 1967, т. 37, вып. 7, с. 1244.

33. Ранцев-Картин В.А., Трубников Б.А. О геометрии магнитных полей конвективно устойчивых плазменных конфигураций. — Физика плазмы, 1967, с. 3.
34. Михайловский А.Б., Тимофеев А.В. О циклотронной неустойчивости неоднородной плазмы. — ЖЭТФ, 1963, т. 44, вып. 3, с. 919.
35. Пистунович В.И. Циклотронная неустойчивость в плазме Огры. — Атомная энергия, 1963, т. 14, № 1, с. 72.
36. Погуце О.П. Циклотронная неустойчивость плазмы со столкновениями. — ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 3, с. 941.
37. Пистунович В.И., Тимофеев А.В. К вопросу о нагреве электронов в анизотропной плазме. — ДАН, 1964, т. 159, № 4, с. 779.
38. Михайловский А.Б., Пашицкий Э.А. К теории устойчивости ионного пучка, инжектируемого в плазму поперек магнитного поля. — ЖТФ, 1965, т. 35, № 11, с. 1960.
39. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П., Пистунович В.И. О циклотронной неустойчивости плазмы. — Ядерный синтез, 1963, т. 3, вып. 1, с. 38.
40. Михайловский А.Б. Нелинейная теория дрейфово-циклотронной неустойчивости неизотермической плазмы. — ДАН, 1964, т. 158, № 5, с. 1068.
41. Тимофеев А.В., Пистунович В.И. Циклотронная неустойчивость анизотропной плазмы. — Вопросы теории плазмы, 1967, вып. 3, с. 351.
42. Тимофеев А.В. О вспышках циклотронного излучения. — ЖЭТФ, 1966, т. 4, вып. 2, с. 48.
43. Артеменков Л.И., Васильев З.П. и др. Получение горячей плазмы на установке Огра-2 с инжекцией в магнитную ловушку быстрых атомов водорода. — Вена: АЕА, 1966, т. 2, с. 45.
44. Кадомцев Б.Б., Михайловский А.Б., Тимофеев А.В. Волны с отрицательной энергией в диспергирующих средах. — ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 6(12), с. 2266.
45. Пистунович В.И., Тимофеев А.В. К вопросу о нагреве электронов в анизотропной плазме. — ДАН, 1964, т. 159, вып. 4, с. 779.
46. Михайловская Л.В. Циклотронная неустойчивость моноэнергичных ионов в кривом магнитном поле. — ЖЭТФ, 1967, т. 5, вып. 9, с. 339.
47. Петвиашвили В.И. О нелинейных ион-циклотронных колебаниях плазмы. — ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 10, с. 1763.
48. Бортников А.В., Бревнов Н.Н., Жуковский В.Г., Романовский М.К. Измерение пороговой плотности при возникновении ионно-циклотронной неустойчивости плазмы с горячими ионами. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4, с. 1248.
49. Байбородов Ю.Т., Иоффе М.С., Соболев Р.И., Юшманов Е.Е. Ионно-циклотронная неустойчивость в адиабатической ловушке с «Min В». — В сб.: 2-я Европейская конференция по управляемому синтезу и физике плазмы (доклады). Стокгольм, 1967.
50. Готт Ю.В., Иоффе М.С., Тельковский В.Г. Некоторые новые результаты по удержанию плазмы в магнитной ловушке. — Ядерный синтез, 1962, т. 3, с. 1045.
51. Иоффе М.С., Соболев Р.И. Удержание плазмы в ловушке с комбинированным магнитным полем. — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 5, с. 366.
52. Морозов А.И., Ковров П.Е., Виноградова А.К. Экспериментальное подтверждение существования стационарных сжимающихся течений плазмы. — ЖЭТФ, 1968, т. 7, вып. 8, с. 257.
53. Аликаев В.В., Глаголев В.М., Морозов С.А. Анизотропная неустойчивость электронно-горячей плазмы в адиабатической ловушке. — В сб.: 2-я Европейская конференция по управляемому синтезу и физике плазмы (доклады). Стокгольм, 1967.
54. Бортников А.В., Бревнов Н.Н., Жуковский В.Г., Романовский М.К. Экспериментальное изучение ионно-циклотронной неустойчивости плазмы в пробкотроне. — Там же.
55. Бортников А.В., Бревнов Н.Н., Жуковский В.Г., Романовский М.К. Измерение пороговой плотности при возникновении ионно-циклотронной неустойчивости плазмы с горячими ионами. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1248.
56. Аликаев В.В., Глаголев В.М., Морозов С.А. Анизотропная неустойчивость электронно-горячей плазмы в адиабатической ловушке. — Plasma Physics, 1968, т. 10, вып. 8, с. 753.
57. Завойский Е.К., Рудаков Л.И. Турбулентный нагрев плазмы. — Атомная энергия, 1967, т. 23, вып. 5, с. 417.
58. Завойский Е.К. Коллективные взаимодействия и проблема получения высокотемпературной плазмы. — Там же, 1963, т. 14, вып. 1, с. 57.
59. Бабыкин М.В., Гаврин П.П., Завойский Е.К. и др. Турбулентный нагрев плазмы в прямом разряде. — ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 4(10), с. 1597.
60. Фанченко С.Д., Демидов Б.А., Елагин Н.И., Рютов Д.Д. Поглощение энергии, обусловленное пучковой неустойчивостью плазмы в тороидальной системе. — Там же, т. 46, вып. 2, с. 497.
61. Стефановский А.М. Ускорение электронов плазмы. — Ядерный синтез, 1965, т. 5, с. 215.
62. Бажанова А.Е., Шафранов В.Д. Об излучении заряда, движущегося в плазме вблизи циклотронного резонанса. — ДАН, 1962, т. 149, вып. 5, с. 1049.
63. Бабыкин М.В., Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А. Наблюдение двухпотоковой ионной неустойчивости при турбулентном нагреве плазмы. — ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 5(11), с. 1976.
64. Галеев А.А., Моисеев С.С., Сагдеев Р.З. Теория устойчивости неоднородной плазмы и аномальная диффузия. — Атомная энергия, 1963, т. 15, вып. 6, с. 451.
65. Демидов Б.А., Елагин Н.И., Рютов Д.Д., Фанченко С.Д. Аномальное сопротивление и сверхчастотное излучение плазмы в сильном электрическом поле. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 2, с. 454.
66. Демидов Б.А., Фанченко С.Д. Поиски комбинационного рассеяния электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне на турбулентной плазме. — Там же, т. 2, вып. 12, с. 533.

ыкин М.В., Гаврин П.П., Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А. Турбулентный нагрев плазмы током прямого разряда. — Вена: АЕА, 1966, т. 2, с. 851.

68. Скорюпин В.А. Разрушение аномального скин-слоя в турбулентной плазме. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1213.
69. Завойский Е.К., Недосеев С.Л., Рудаков Л.И. Нагрев ионов в турбулентной плазме. — Там же, т. 6, вып. 11, с. 951.
70. Тимофеев А.В. Оценка коэффициентов переноса в турбулентной плазме. — Ядерный синтез, 1968, т. 8, вып. 1, с. 13.
71. Фанченко С.Д., Демидов Б.А., Елагин Н.И., Перепелкин Н.Ф. Турбулентный нагрев плазмы в торе. — ДАН, 1968, т. 183(1), с. 77.
72. Фанченко С.Д., Демидов Б.А., Елагин Н.И., Перепелкин Н.Ф. — Турбулентный нагрев плазмы в торах. — Plasma Physics, 1968, т. 21, вып. 12, с. 7.
73. Бабыкин М.В., Гаврин П.П., Демидов Б.А. и др. Изучение производимой током турбулентно нагретой плазмы. — В сб.: 2-я Европейская конф. по управляемому синтезу и физике плазмы. Стокгольм, 1967.
74. Бабыкин М.В. Турбулентный нагрев плазмы при аннигиляции встречных магнитных полей. — ЖТФ, 1968, т. 38, вып. 4, с. 603.
75. Арэфьев В.И., Кован И.А., Рудаков Л.И. Турбулентный нагрев плазмы электромагнитными волнами. — ЖЭТФ, 1968, т. 7, вып. 8, с. 286.
76. Кован И.А., Спектор А.М. Нагревание ионов при возбуждении в плазме магнитно-звуковых колебаний. — Там же, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1278.
77. Калинин Ю.Г., Лин Д.Н., Рютов В.Д., Скорюпин В.А. Рассеяние электромагнитных волн на турбулентных пульсациях плазмы. — Там же, 1968, т. 55, вып. 1(7), с. 115.
78. Арэфьев В.И. Турбулентный нагрев ионов магнитогидродинамическими волнами. — Там же, вып. 2(8), с. 679.
79. Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Фанченко С.Д. Турбулентный нагрев плазмы током. — В сб.: Труды симпозиума по коллективным процессам в плазме. Издание Института ядерной науки и технологии, г. Сакле, 1968, т. 1, с. 203.
80. Иванов А.А., Рютов Д.Д. Излучение электромагнитных волн с двойной плазменной частотой из плоского слоя плазмы. — ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 2, с. 684.
81. Иванов А.А., Рютов Д.Д. Рассеяние электромагнитных волн плазменными колебаниями в плоском слое плазмы. — Там же, вып. 5, с. 1366.
82. Орлинский Д.В., Осовец С.М., Синицын В.И. Динамическая стабилизация плазменного шнура. — Вена, АЕА, 1966, т. 2, с. 313.
83. Леонтович М.А. Обобщение формул Крамерса—Кронига на среды с пространственной дисперсией. — ЖЭТФ, 1962, т. 40, вып. 3, с. 907.
84. Морозов А.И., Шубин А.П. К теории электромагнитных процессов при наличии эффекта Холла. — Там же, 1964, т. 46, вып. 2, с. 710.
85. Михайловский А.Б. Конвективные эффекты в плазме с пучками. — Атомная энергия, 1966, т. 20, вып. 2, с. 103.
86. Незлин М.В. Электростатическая неустойчивость интенсивного электронного пучка в плазме. — ЖЭТФ, 1961, т. 41, вып. 4(10), с. 1015.
87. Незлин М.В., Солнцев А.М. Ускорение ионов в плазменных пучках. — Там же, 1963, т. 45, вып. 4(10), с. 840.
88. Незлин М.В. Образование виртуального катода в электронном пучке, проходящем через плазму. — Там же, 1964, т. 46, вып. 1, с. 36.
89. Незлин М.В., Солнцев А.М. Неустойчивый плазменный пучок. — Там же, 1965, т. 48, вып. 5, с. 1237.
90. Михайловский А.Б., Пашицкий Э.А. Конвективная раскачка ионных колебаний плазмы неоднородным электронным пучком. — ЖТФ, 1966, т. 36, вып. 5, с. 763.
91. Михайловский А.Б., Юнгвирт К. О роли конвективных эффектов при возбуждении электронных колебаний плазмы ограниченным пучком. — Там же, 1963, т. 36, вып. 5, с. 777.
92. Незлин М.В., Солнцев А.М., Сапожков Г.И. Длинноволновые электронные колебания в системе пучок—плазма. — ЖЭТФ, 1966, т. 50, вып. 2, с. 349.
93. Иванов А.А., Рудаков Л.И. Динамика квазилинейной релаксации бесстолкновительной плазмы. — Там же, т. 51, вып. 5(11), с. 1522.
94. Костин В.М., Тимофеев А.В. Об устойчивости электронного потока с градиентом плотности. — Там же, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1378.
95. Незлин М.В., Солнцев А.М. Предельные токи и электрон-ионные колебания в квазинейтральных электронных пучках. — Там же, вып. 2(8), с. 437.
96. Незлин М.В., Трубников А.С., Тактакишвили М.И. Пороги пучковых неустойчивостей. — Там же, 1968, т. 55, вып. 2(8), с. 397.
97. Незлин М.В. О природе трехступенчатой неустойчивости плазменного пучка. — Там же, 1967, т. 53, вып. 4(10), с. 1180.
98. Незлин М.В., Солнцев А.М. О дискретных состояниях плазменного пучка и переходах между ними. — Там же, 1965, т. 49, вып. 5(11), с. 1377.
99. Михайловский А.Б. К теории устойчивости пространственно-неоднородного тока в плазме. 2. Волны с частотой выше ионно-циклотронной. — ЖТФ, 1965, т. 35(11), с. 1945.
100. Бабыкин М.В., Гаврин П.П., Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А. Турбулентный нагрев плазмы. — ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 2(8), с. 411.
101. Незлин М.В. Неустойчивость плазмы и компенсация объемного заряда в ионном пучке. — Plasma Physics, 1968, т. 10(4), с. 337.

(Продолжение следует)