

## Развитие неустойчивостей в неравновесной стратифицированной водородной плазме

© А.В. Козырев, М.Ю. Докукин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Представлены проведенные экспериментальное исследование и теоретический анализ возможных неустойчивостей в неравновесной стратифицированной плазме. В результате комплексных зондовых измерений и соответствующих спектральных исследований в водородном разряде промежуточного давления с удельной мощностью разряда  $3...5 \text{ кВт/м}^3$  (при токах  $200...300 \text{ мА}$ ) выявлена неоднородная структура плазменного образования. Анализ полученных данных свидетельствует о наличии неустойчивого плазменного слоя в голове страты с развитой ионно-звуковой турбулентностью и относительно устойчивого диффузного хвоста в данном разряде. С кинетических позиций наличие ионно-звуковой неустойчивости приводит к квазилинейной релаксации функции распределения электронов. Для проверки и выбора проявляющихся в данных разрядных условиях плазменных неустойчивостей был обоснован выбор температуры ионов, соответствующий средней температуре электронов в хвосте страты. Была также доказана возможность генерации ионно-звуковых плазмонов под действием параметрической неустойчивости.*

**Ключевые слова:** газовый электрический разряд, стратифицированная плазма, зондовая диагностика, неустойчивость в плазме, плазмоны

**Введение.** Несамостоятельный дуговой разряд в водородной среде с подогреваемым катодом относят к промежуточным разрядам [1], так как здесь соответствующий параметр подобия по давлению  $p_0 r_0 \sim 15 \text{ Торр} \cdot \text{см}$  ( $r_0$  — радиус разрядной трубки) имеет промежуточное значение между стратами повышенного и низкого давления. Разрядам такого вида свойственны свои особенности: в этой области разрядных параметров приведенное электрическое поле  $E/n$  ( $n$  — концентрация частиц рабочей среды) недостаточно велико по сравнению со стратами низкого давления и в балансе энергии электронов присутствуют не только потери энергии в ходе неупругих столкновений с атомами [2], но и, по-видимому, энергетические потери при взаимодействии с турбулентными волнами.

В таких условиях ионизационные волны (перемещающиеся страты) могут быть приближенно описаны с позиции гидродинамического подхода. При этом в плазме реализуется режим ионно-звуковой турбулентности с аномальным сопротивлением. С точки зрения статистической физики функция распределения электронов (ФРЭ) в голове страты имеет более быстро спадающие «хвосты» или, иначе говоря, «бунчуруется» [1], а на ФРЭ сказывается влияние стохастических токовых процессов в голове страты.

Цель данной работы — представить решение следующих задач: идентификация типов наблюдаемых неустойчивостей в плазме данного разряда, теоретическое осмысление и анализ полученных результатов, используемых для построения модели, удовлетворяющей экспериментальным показаниям.

**Экспериментальное исследование.** Изучение возникающей турбулентности в разряде, имеющем удельную мощность  $w = 1 \dots 5 \text{ кВт/м}^3$  (токи разряда  $I = 200 \dots 300 \text{ мА}$ ), проводилось на экспериментальной установке (рис. 1) с помощью высокочастотных электрических зондов резонансным методом [3]. На зонды подавался высокочастотный ток-овый сигнал (волна накачки) и регистрировался анализатором спектра С4–25 отклик в виде спектра напряжения на измерительном сопротивлении  $R_3$ .

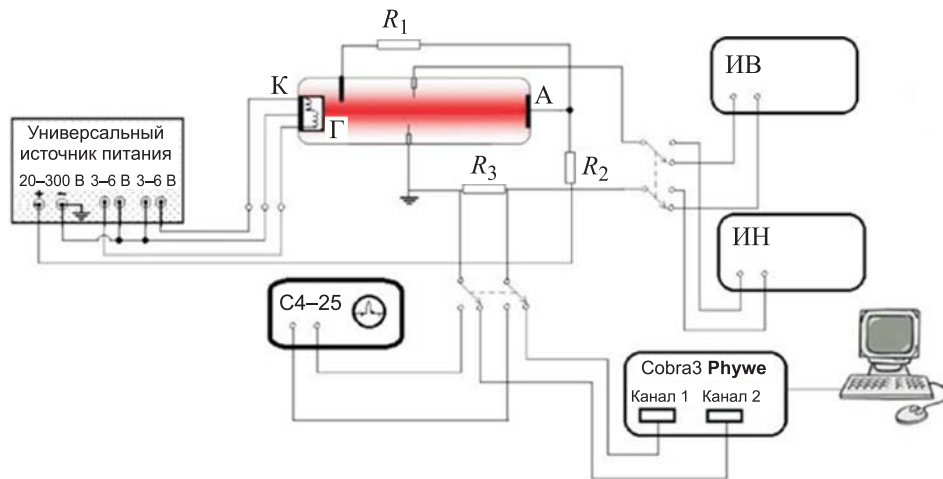


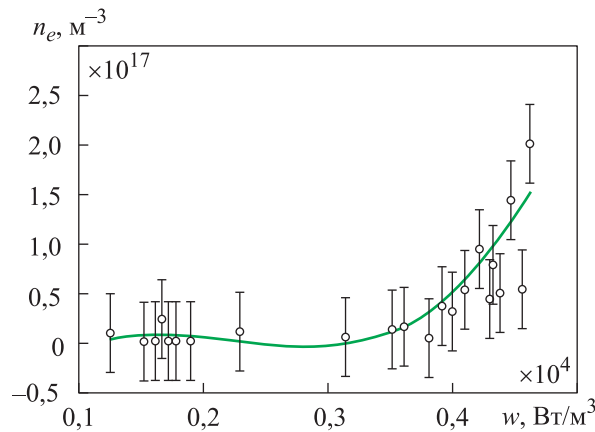
Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

ИВ — источник высокочастотный; ИН — источник низкочастотный

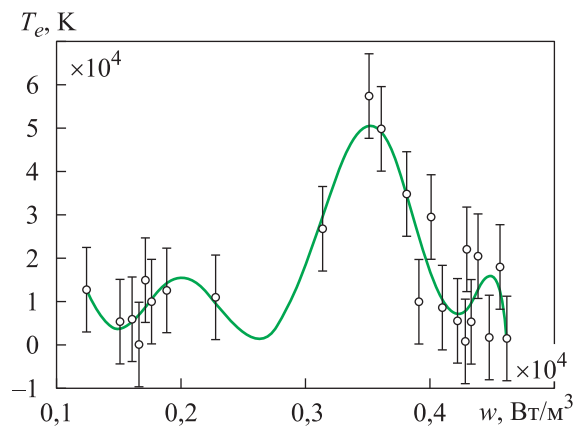
В ходе экспериментальных исследований водородной стратифицированной плазмы низкого давления были получены зависимости плазменных параметров от удельной мощности разряда (рис. 2, 3), анализ которых показывает существенное влияние стратификации разряда на локальные характеристики плазмы. На основе этих зависимостей и результатов проводимых аналогичных экспериментов [4–6], а также с использованием кинетической теории стратификации [1, 2] была проведена идентификация типов ( $S$ ,  $P$ ) наблюдаемых страт, что позволяет определить те параметры разряда, при которых происходит скачкообразный переход страт из одного типа в другой.

В проводимых экспериментах на газоразрядной трубке наблюдалась активная динамика плазменных образований — страт, положение которых относительно зондов определяется уровнем удельной

мощности разряда. Так, при изменении удельной мощности на 8 % происходил сдвиг страт от катода к аноду трубки на расстояние, примерно равное продольному размеру страты  $d \approx 11 \pm 1$  мм. Наряду с тем, что этот процесс визуально фиксировался, его можно было регистрировать по показаниям неподвижных электрических зондов. Поэтому максимумы электронной температуры, соответствующие положению зонда в головах страт, наблюдаются на рис. 3.

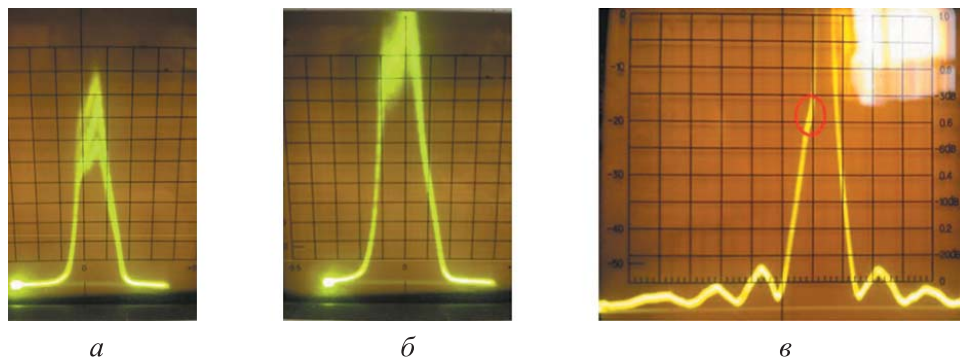


**Рис. 2.** Зависимость концентрации электронов  $n_e$  от удельной мощности разряда  $w$



**Рис. 3.** Зависимость температуры электронов  $T_e$  от удельной мощности разряда  $w$

В случае, если зонды оказывались в хвосте страты, то на всех частотах внешнего возбуждающего поля наблюдался ровный колоколообразный спектр. Когда зонды оказывались в области головы страты при узкой полосе пропускания  $\Delta\omega = 0,3$  МГц на частотах 9...60 МГц, характерных для ионно-звуковых волн, спектр подвергался стохастическим пульсациям (рис. 4).



**Рис. 4.** Осциллограммы отклика зондов на волну накачки:

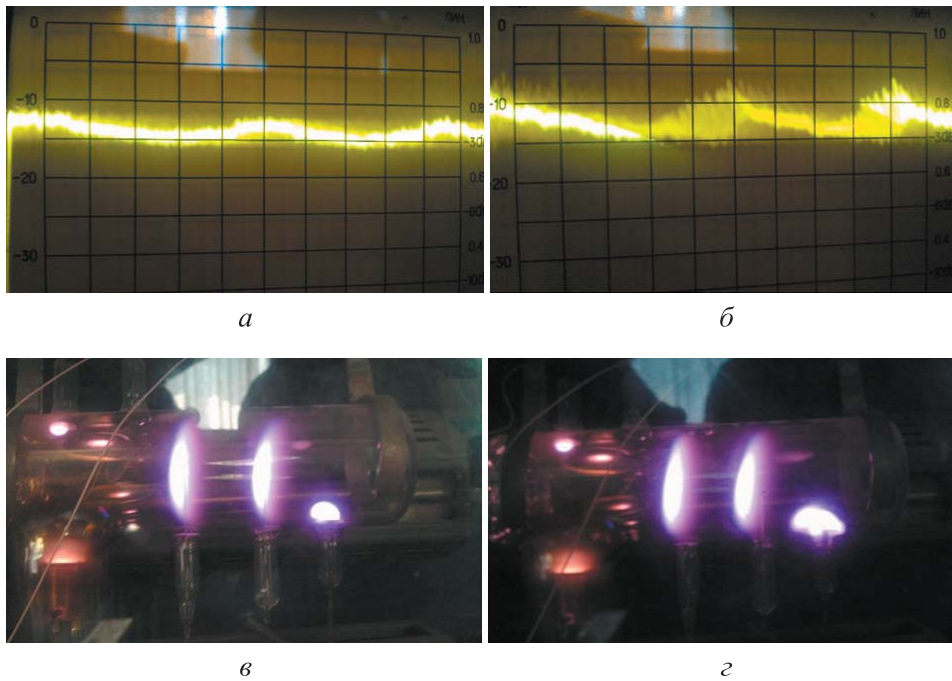
при узкой спектральной полосе  $\Delta\omega \approx 0,3$  МГц, частоте  $\omega = 58$  МГц и удельной мощности, равной  $3,08$  кВт/м<sup>3</sup> (а) и  $3,42$  кВт/м<sup>3</sup> (б); при широкой спектральной полосе  $\Delta\omega \approx 5$  МГц, частоте  $\omega = 61$  МГц и  $w = 3,51$  кВт/м<sup>3</sup> (в)

Для разрешения особенностей спектра резонансного зонда (красный кружок на рис. 4, в) использовалась узкая спектральная полоса (0,3 МГц) пропускания анализатора спектра. Возмущение спектра флуктуаций зондового тока насыщения происходило тогда, когда страта находилась вблизи зонда.

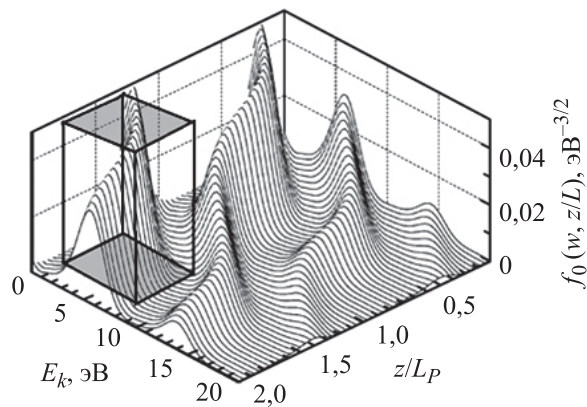
На рис. 5 представлены фотографии исследуемых стратифицированных разрядов и соответствующие осциллограммы флуктуаций зондового тока насыщения в условиях удельной мощности разряда  $w_1 = 3,42$  кВт/м<sup>3</sup> (спектр тока слабо возмущен — рис. 5, а, при этом зонды находились в диффузионном хвосте страты — рис. 5, в) и удельной мощности  $w_2 = 3,51$  кВт/м<sup>3</sup>, когда наблюдались заметные высокочастотные флуктуации тока (рис. 5, б), а зонды находились во фронте головы страты (рис. 5, г).

Наблюдаемые на рис. 3 максимумы электронной температуры связаны с выполнением условий возникновения резонанса функции распределения электронов (ФРЭ) в голове страт в пространственно периодическом поле разряда. При некоторых значениях длины пространственного периода поля в результате релаксации ФРЭ стягивается к узким максимумам, перемещающимся в плоскости полной энергии  $\varepsilon$  и координаты  $z$  вдоль оси разрядной трубки по резонансным траекториям  $\varepsilon \approx \text{const}$ . При отличии длины пространственного периода от некоторого резонансного значения возникает расплывание максимумов ФРЭ, что приводит к исчезновению резонансной структуры.

Для сравнения приводится ФРЭ, полученная в работе [1] для  $P$  страт (рис. 6). Здесь выделенный объем соответствует левой страте на фотографии рис. 5, г. Возможным объяснением наблюдаемых экспериментальных данных является предположение о том, что стохастические потоки электронов разряда во фронте головы страты приводят к возбуждению в нем ионно-звуковой турбулентности плазмы.



**Рис. 5.** Осциллограммы флуктуаций зондового тока насыщения и фотографии исследованных стратифицированных разрядов при удельной мощности  $w_1 = 3,42 \text{ кВт/м}^3$  (а и в) и  $w_2 = 3,51 \text{ кВт/м}^3$  (б и г)



**Рис. 6.** Функция распределения электронов для  $P$  страт [1]:

$E_k$  — кинетическая энергия электронов;  $z/L_p$  — удельная координата ( $z$  — координата,  $L_p$  — длина  $P$  страты)

Наблюдаемые эффекты могут быть описаны в рамках физической модели двух частичных стохастических взаимодействий токовых электронов с ионно-звуковыми шумами (на языке квазичастиц — ионно-звуковыми плазмонами).

**Теоретический анализ и экспериментальные результаты.** Появление пульсаций в регистрируемом спектре можно связать с возникновением неустойчивостей в плазменном образовании. В данной работе для проверки условий появления ионно-звуковой и Бунемановской неустойчивостей использовался критерий Пенроуза [8]. А именно, Бунемановская неустойчивость (БН) наблюдается тогда, когда скорость дрейфа электронов  $u_0$  подчиняется условию

$$u_0 > 1,3 \sqrt{\frac{\kappa T_e}{m_e}} \quad (\text{здесь и далее } \kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К — постоянная Больцмана})$$

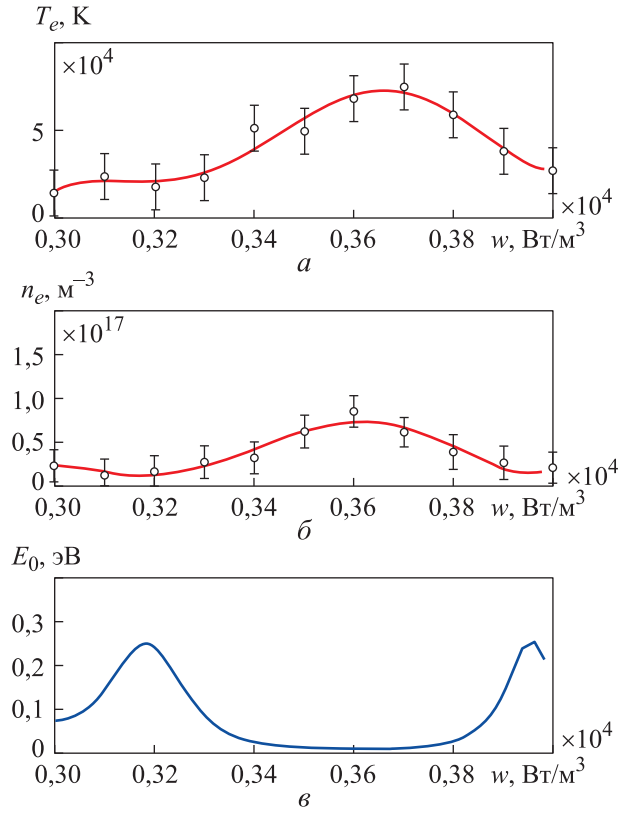
и ионно-звуковая неустойчивость (ИЗН), которой также присуще неравенство ионной и электронной температур  $T_i \ll T_e$ , проявляется, когда выполняется условие

$$u_0 > \sqrt{\frac{\kappa T_i}{m_i}}.$$

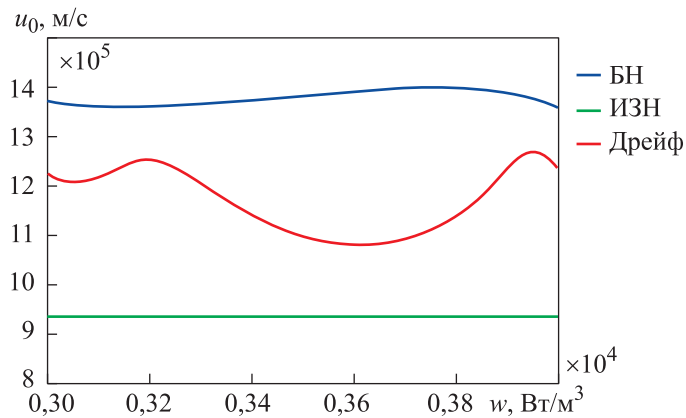
Результаты эксперимента по определению основных параметров изучаемой стратифицированной плазмы (температура  $T_e$ , концентрация  $n_e$  и средняя энергия дрейфа  $E_0$  электронов), генерируемой на установке, с применением блока цифроаналогового преобразования зондового сигнала Cobra 3 Basic Unit [4] и компьютерного программного комплекса Phywe Measure, приведены на рис. 7. По этим данным была также проведена оценка средней направленной скорости (скорости дрейфа) электронов относительно зондов.

По данным, представленным на рис. 7 (во всем рабочем диапазоне удельной мощности разряда  $w = 3 \dots 4 \text{ кВт/м}^3$ ), были построены зависимости скорости дрейфа электронов и ее критических значений, при которых развиваются соответствующие неустойчивости (рис. 8). На графиках видно, что условие для БН нигде не выполнено, а условие на ИЗН выполнено только в узком слое головы страты, которому соответствует удельная мощность  $w = 3,0 \dots 3,8 \text{ кВт/м}^3$  и максимум температуры электронов  $T_e = 5,1 \cdot 10^4 \text{ К}$  (см. рис. 3).

Следует еще раз отметить, что для применения условия Пенроуза на ИЗН необходимо, чтобы плазма была в неравновесном состоянии и выполнялось, по крайней мере, неравенство для ее температур  $T_e \geq (3 \dots 6)T_i$ . Но поскольку прямые измерения ионной температуры не осуществимы из-за множества факторов, маскирующих ее влияние на снимаемую зондовую характеристику, в качестве верхней оценки для температуры ионов была выбрана температура электронов в диффузионном хвосте страты. Таким образом, в голове страты существует ионно-звуковая турбулентность, вызванная наличием ИЗН, а не БН. К тому же БН является существенно нелинейным эффектом, и ее инкремент нарастания поддается описанию только в рамках сильной турбулентности (в отличие от ИЗН).



**Рис. 7.** Результаты зондовых измерений параметров плазмы  $T_e$  и  $n_e$  и расчета средней энергии электронов  $E_0$  в зависимости от удельной мощности разряда:  $a$  — температура электронов;  $b$  — концентрация электронов;  $v$  — средняя энергия дрейфа электронов



**Рис. 8.** Скорость дрейфа электронов и ее критические значения для соответствующих неустойчивостей от удельной мощности разряда

Обоснованием выбора того, что в качестве оценочной температуры ионов была принята температура электронов в хвосте страты, служит следующая модель. Разогрев плазмы в голове страты может происходить за счет турбулентного нагрева. Утверждать, что такой сценарий возможен, позволяет количественное сравнение масштаба турбулентности:

$$L = 2\pi \frac{\sqrt{kT_e / m_i}}{\omega},$$

который для рассматриваемого эксперимента на резонансной частоте  $\omega \approx 60$  МГц составлял  $L \approx 1$  мм с характерным визуальным размером страты  $d \approx 12$  мм. В данном случае выполнялось условие  $L < d$ , которое позволяло воспользоваться предположением турбулентного нагрева плазменного образования.

Относительный нагрев ионов и электронов по причине этого механизма можно определить с помощью выражения [3]

$$\frac{dE_e}{dE_i} = \frac{u_0}{(\omega / k)} = \frac{u_0}{v_s} \sqrt{1 + (kr_{De})^2},$$

где  $k = \frac{\omega}{v}$  — волновое число;  $v_s$  — скорость звука в водороде, отне-

сенная к температуре 273К,  $v_s \approx 1280$  м/с;  $r_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2}}$  — радиус

Дебая для электронов (здесь  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная).

В представленном выше выражении под радикалом стоит величина, которая всегда несколько больше 1, поэтому  $\frac{dE_e}{dE_i}$  определяется

в основном отношением скоростей  $\frac{u_0}{v_s}$ , в котором скорость дрейфа

электронов ( $u_0 \geq 10^5$  м/с) доминирует и, следовательно, нагрев электронов происходит гораздо интенсивнее, чем ионов.

Согласно [9], энергетический спектр  $\epsilon_\omega$  ИЗТ определяется соотношением  $\epsilon_\omega \sim \frac{v_s}{\omega} \ln \frac{2\pi v_s}{\omega r_{De}}$ , что приблизительно подтверждается радио-

спектральными измерениями в голове страты.

Поскольку остывание плазмы происходит преимущественно при контакте частиц со стенками газоразрядной трубки, более подвижные электроны остывают быстрее ионов. Поэтому средняя температура



электронов быстро спадает по мере ухода из области ионизации, где собственно и проявляется интенсивная ионно-звуковая турбулентность. Причем следует отметить, что более коротковолновые пульсации порождают более высокую неизотермичность в плазме.

При длинноволновых пульсациях в предположении единственного механизма увеличения температуры — в ходе турбулентного нагрева ионов, последний может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{d(kT_e)}{d(kT_i)} = \sqrt{m_i} u \frac{1}{\sqrt{kT_e}}, \quad \frac{T_e^{3/2}}{u_0 \sqrt{m_i / k}} = T_i.$$

Оценка турбулентного нагрева ионов для характерных параметров головы  $P$  страты данного эксперимента не превышает 10К, что является еще одним основанием правомочности выбора величины температуры ионов близкой по значению к температуре электронов в хвосте страты.

В ходе экспериментов (см. рис. 5, *a*) было выявлено, что в хвосте страты ионно-звуковая турбулентность не возникает (условие Пенроуза на ИЗН в этой области не выполнено). Следовательно, ионная температура приближается к электронной, а, соответственно, условие ионно-звуковой неустойчивости перетекает в условие Бунемановской. Поэтому можно считать, что температура ионов выровнена по всей длине газоразрядной трубки вследствие амбиполярной диффузии и остывания на стенках, а электроны претерпевают сильный турбулентный нагрев в головах страт. Тогда можно заключить, что в любой точке страты ионная температура близка к электронной температуре в хвосте страты. Таким образом, неизотермичность плазмы уменьшается при перемещении от головы к диффузионному хвосту страты.

С кинетических позиций наличие ионно-звуковой неустойчивости приводит к квазилинейной релаксации распределения электронов. Этот процесс можно в случае изотропной плазмы описать системой квазилинейных кинетических уравнений. При этом инкремент нарастания ИЗН можно представить так [3]:

$$\gamma_i = \frac{\omega \left( \frac{ku_0}{\omega} - 1 \right)}{\left( 1 + k^2 r_{De}^2 \right)^{3/2}} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8 m_i}}.$$

Из выражения инкремента видно, что раскачиваются пульсации с фазовыми скоростями, большими чем  $u_0$ . Причем раскачиваются лишь те волны, которые перемещаются по направлению дрейфа частиц. Однако только ионно-звуковая неустойчивость не может вызывать

эффектов, наблюдаемых в эксперименте, так как амплитуда пульсаций сравнима с амплитудой волны накачки. Поэтому в дальнейших экспериментах с целью более детального анализа такого типа электрических разрядов, возможно, потребуется исследование других плазменных неустойчивостей, например параметрической.

**Заключение.** Результаты проведенных измерений характеристик стратифицированной плазмы в водородном разряде промежуточного давления в диапазоне удельной мощности разряда  $1 \dots 5$  кВт/м<sup>3</sup> позволяют утверждать, что в голове страты возбуждаются и распространяются ионно-звуковые колебания, поддерживающие неравновесность в плазме по температуре. Сама плазменная страта имеет структуру неустойчивого слоя в своей головной части с развитой ионно-звуковой турбулентностью и устойчивого диффузионного хвоста.

В процессе анализа результатов экспериментов было установлено, что температура ионов по всей длине разрядной трубки из-за амбиполярной диффузии [10] и остывания на стенках близка к электронной температуре в диффузионном хвосте страты, а электроны претерпевают сильный турбулентный нагрев в ее головной части.

*Авторы данной статьи выражают благодарность В.Е. Чинкину за активное участие в экспериментах и обсуждении их результатов.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Прогресс в исследовании страт в инертных газах. *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, № 12, с. 50–62.
- [2] Цендин Л.Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме. *Успехи физических наук*, 2010, т. 180, № 2, с. 139–164.
- [3] Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. *Основы физики плазмы*. Москва, Атомиздат, 1977, 385 с.
- [4] Козырев А.В., Ланцов А.В. Исследование газоразрядной стратифицированной плазмы с использованием среды Phywe Measure. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3 (39). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2015-3-1381>
- [5] Анфимов Д.Р., Бакуров М.С., Касьян В.Г., Козырев А.В., Спиридонов Л.Е. Исследование стратифицированного He–Ne разряда с холодным катодом. *Труды Десятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, т. 3, с. 85–88.
- [6] Козырев А.В., Шibaева А.Д. Лабораторная работа «Зондовый метод диагностики плазмы». *Физическое образование в вузах*, 2021, т. 27, № 1, с. 41–49.
- [7] Козырев А.В., Анфимов Д.Р., Басак А. Лабораторная работа по рассеянию микроволн на цилиндрическом He–Ne плазменном образовании. *Физическое образование в вузах*, 2021, т. 27, № 1, с. 50–59.
- [8] Ишимару С. *Основные принципы физики плазмы*. Москва, Атомиздат, 1975, 288 с.

- [9] Кадомцев Б.Б. *Коллективные явления в плазме*. Москва, Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1988, 304 с.
- [10] Белозор Д.А., Козырев А.В. Экспериментальное исследование амбиполярной диффузии магнитоактивной стратифицированной плазмы. *Труды Девятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, т. 1, с. 145–147.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Козырев А.В., Докукин М.Ю. Развитие неустойчивостей в неравновесной стратифицированной водородной плазме. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-2-2335>

**Козырев Александр Валентинович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 100 научных трудов в области физики и техники неравновесной плазмы. e-mail: [kozykryl@gmail.ru](mailto:kozykryl@gmail.ru)

**Докукин Михаил Юрьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — физика плазмы, физическое образование. e-mail: [DMU252@yandex.ru](mailto:DMU252@yandex.ru)

## Instability development in the non-equilibrium stratified hydrogen plasma

© A.V. Kozyrev, M.Yu. Dokukin

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, 105005, Russian Federation

*The paper presents experimental study and theoretical analysis of possible instabilities in the non-equilibrium stratified plasma. Complex probe measurements and corresponding spectral research in a hydrogen discharge of intermediate pressure with the specific discharge power of 3...5 kW/m<sup>3</sup> (currents of 200...300 mA) identified inhomogeneous structure of the plasma formation. Analysis of the data obtained indicates presence of the unstable plasma layer in the stratum head with the developed ion-acoustic turbulence and of the relatively stable diffuse tail in that discharge. From the kinetic point of view, presence of the ion-acoustic instability leads to quasi-linear relaxation in the electron distribution function. To check and select plasma instabilities manifesting under the given discharge conditions, the ion temperature choice was justified corresponding to the average electron temperature in the stratum tail. The paper also proves possibility of generating the ion-acoustic plasmons under the parametric instability.*

**Keywords:** gas electric discharge, stratified plasma, probe diagnostics, plasma instability, plasmons

### REFERENCES

- [1] Golubovsky Yu.B., Nekuchaev V.O., Skoblo A.Yu. Progress v issledovanii strat v inertnykh gasakh [Advances in the study of striations in inert gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 12, pp. 50–62.
- [2] Tsendin L.D. Nelokalnaya kinetika elektronov v gazorazryadnoy plazme [Non-local electron kinetics in gas-discharge plasma]. *Uspekhy fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi*, 2010, vol. 180, no. 2, pp. 139–164.
- [3] Golant V.E., Zhilinsky A.P., Sakharov S.A. *Osnovy fiziki plazmy* [Fundamentals of plasma physics]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 385 p.
- [4] Kozyrev A.V., Lantsov A.V. Issledovanie gazorazryadnoy stratifitsirovannoy plazmy s ispolzovaniem sredy Phywe Measure [Study of gas-discharge stratified plasma using the Phywe Measure environment]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 3 (39). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-3-1381>
- [5] Anfimov D.R., Bakurov M.S., Kasyan V.G., Kozyrev A.V., Spiridonov L.E. Issledovanie stratifitsirovannogo He–Ne razryada s kholodnym katodom [Investigation of a stratified He–Ne discharge with a cold cathode]. In: *Trudy Desyatoy Vserossiyskoy konferentsii “Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike”* [Proceedings of the Tenth All-Russian Conference “Irreversible processes in nature and technology”]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, vol. 3, pp. 85–88.
- [6] Kozyrev A.V., Shibaeva A.D. Laboratornaya rabota “Zondovyi metod diagnostika plazmy” [Laboratory work “Probe method for plasma diagnostics”]. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh — Physical education in universities*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 41–49.
- [7] Kozyrev A.V., Anfimov D.R., Basak A. Laboratornaya rabota po rasseyaniyu mikrovoln na tsilindricheskom He–Ne plazmennom obrazovanii [Laboratory work on microwave scattering on the cylindrical He–Ne plasma formation].

- Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh — Physical education in universities*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 50–59.
- [8] Ichimaru S. *Basic Principles of Plasma Physics*. W.A. Benjamin, 1973 [In Russ.: Ishimaru S. *Osnovnye printsipy fiziki plazmy*. Moscow, Atomizdat Publ., 1975, 288 p.].
- [9] Kadomtsev B.B. *Kollektivnye yavleniya v plazme* [Collective phenomena in plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 304 p.
- [10] Belozor D.A., Kozyrev A.V. Eksperimentalnoe issledovanie ambipolyarnoy difuzii magnitoaktivnoy stratifitsirovannoy plazmy [Experimental investigation of ambipolar diffusion of the magnetically stratified plasma]. In: *Trudy Devyatoy Vserossiyskoy konferentsii “Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike”* [Proceedings of the Ninth All-Russian Conference “Irreversible processes in nature and technology”]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, vol. 1, pp. 145–147.

**Kozyrev A.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 100 scientific papers in physics and non-equilibrium plasma technology. e-mail: kozykryl@gmail.ru

**Dokukin M.Yu.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: plasma physics and physical education. e-mail: DMU252@yandex.ru