

Review of the Experimental Methods of Critical Ionization Velocity Investigation

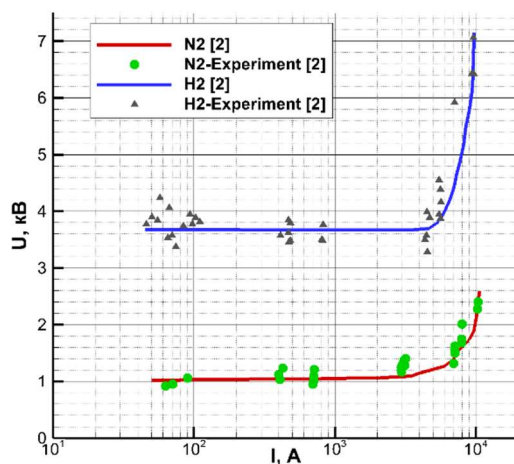
D. S. Yatsukhno

*Ishlinskyi Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia
yatsukhno-ds@rambler.ru*

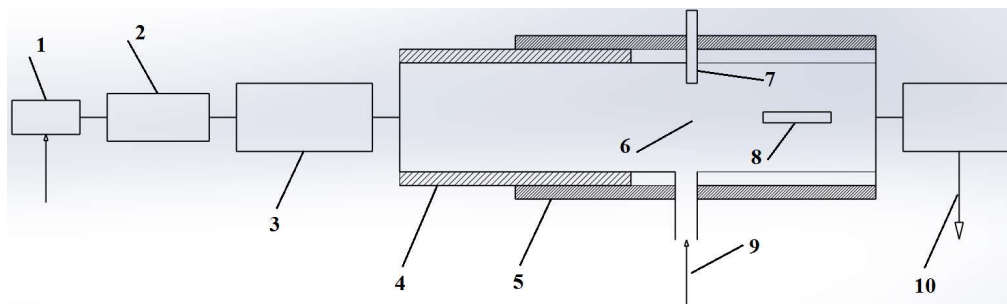
Abstract

This paper is devoted to a review of experimental studies of anomalous ionization phenomena. Within the framework of the article, special attention is paid to the analysis of the results of laboratory studies, as well as the choice of experiments, which take into account the possibility of the consequences of ionization: the relative plasma velocity, the strength of the magnetic field, and the neutral gas density. Some studies describing the specifics of experiments on the study of anomalous ionization in space were considered. The presented results can be used in determining the initial data and setting the problem for a possible numerical study of the critical ionization rate in the framework of the Penning discharge experiment.

Keywords: critical ionization velocity, gas discharge, magnetic field, ionization potential, laboratory investigations, space experiments



Voltage/current characteristic for H₂ и N₂ experimental data [2]



Scheme of experimental setup [3]: 1 – puff valve, 2 – pre discharge coil, 3 – main discharge coil, 4 – axial field coil, 5 – transverse field coil, 6 – interaction region, 7, 8 – probes, 9 – gas valve, 10 – vacuum pump

УДК533.6.011.5

Обзор экспериментальных методов исследования явления критической скорости ионизации

Д. С. Яцухно

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Россия,
Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1*

yatsukhno-ds@rambler.ru

Аннотация

Настоящая работа посвящена обзору экспериментальных исследований явления аномальной ионизации. В рамках статьи основное внимание уделено анализу результатов лабораторных исследований, а также определению диапазона ключевых параметров экспериментов, сочетание которых определяет возможность возникновения эффекта критической скорости ионизации: относительной скорости плазмы, напряженности магнитного поля, плотности нейтрального газа. Отдельно рассмотрены статьи, описывающие специфику экспериментов по исследованию аномальной ионизации в космосе. Представленные результаты могут быть использованы при определении исходных данных и постановки задачи для возможного численного исследования критической скорости ионизации в рамках эксперимента с разрядом Пеннинга.

Ключевые слова: критическая скорость ионизации, газовый разряд, магнитное поле, потенциал ионизации, лабораторные исследования, космические эксперименты.

1. Введение

Понятие критической скорости ионизации (аномальная ионизация, Альфвеновская ионизация, *critical ionization velocity*, CIV) было впервые введено Альфвеном в его работе, посвященной вопросам образования солнечной системы [1]. Аномальная ионизация наблюдается в процессе прохождения потока ионизованного газа через облако неподвижного нейтрального газа при наличии внешнего магнитного поля. Суть данного явления состоит в том, что при достижении скорости относительного движения плазмы и нейтрального газа некоторой величины (которая и называется критической скоростью) происходит резкий рост скорости ионизации. В соответствии с теорией Альфвена выражение для определения критической скорости ионизации имеет вид

$$\frac{1}{2} m V_{crit}^2 = e U_{ion}, \quad (1)$$

где m – масса частицы нейтрального газа; U_{ion} – потенциал ионизации; e – заряд электрона; V_{crit} – критическая скорость.

Теория аномальной ионизации получила свое подтверждение в рамках отдельных лабораторных экспериментов, которые проводились в 60–90-х годах на стендовых установках двух основных типов: разрядных и столкновительных [2–7]. Вместе с тем значительные сложности возникли при объяснении различных эффектов, сопровождающих аномальную ионизацию. Возможности лабораторных установок хотя и позволяют однозначно подтвердить существование данного явления, но при этом не дают исчерпывающего описания протекающих в зоне взаимодействия плазмы и нейтрального газа физических процессов, что

осложняет понимание основного механизма возникновения резкого роста скорости ионизации. Проведение космических экспериментов позволяет преодолеть конструктивные ограничения стендов и исследовать аномальную ионизацию в более широком диапазоне физических параметров [8–10]. Однако, к настоящему моменту получены весьма неоднозначные результаты, касающиеся возможности проявления эффекта критической скорости ионизации в космическом пространстве.

Анализ и обобщение полученных лабораторных данных представлены в серии соответствующих тематических обзоров [11–13]. В работе (Danielsson, 1973 [11]) представлен обзор экспериментальных работ, в основе которых лежит исследование преимущественно бесстолкновительной плазмы. Важным утверждением является о том, что критическая скорость является аналогом предела напряжения, которое может быть реализовано в электрическом разряде плазменной установки. На различных стендах были реализованы следующие диапазоны параметров: напряженность магнитного поля $0 \div 1.8$ Тл, ток $0 \div 10^5$ А, давление $0.001 \div 100$ Торр, напряжение $0.015 \div 8$ кВ. В более позднем обзоре (Brenning, 1982 [12]) акцент был сделан на столкновительных экспериментах, по итогам которых были сделаны практические выводы о минимальном уровне напряженности магнитного поля, обеспечивающего возможность проявления аномальной ионизации, а также обсуждены перспективы экстраполяции ключевых особенностей стендовых экспериментов на условия космического пространства. Наконец в обзорной статье (Piel, 1990 [13]) были представлены выводы о наиболее вероятных механизмах обеспечения ускоренной ионизации частиц нейтрального газа. К таким, например, следует отнести одну из форм плазменной неустойчивости, называемой нижней гибридной нестабильностью, в ходе которой происходит быстрый рост кинетической энергии электронов, которые в свою очередь обеспечивают ионизацию электронным ударом нейтральных частиц. Еще одной возможной причиной аномальной ионизации автор работы [13] считает турбулентный нагрев электронов за счет модифицированной двухпоточковой неустойчивости пламенного пучка.

Более широкий круг вопросов был рассмотрен в обзоре (Lai 2001, [14]), который включал в себя не только результаты лабораторных исследований, но и попытку теоретического обоснования аномальной ионизации. В частности, отмечается, что основной процесс включает ряд побочных явлений, таких как возбуждение линий, формирование метастабильных состояний и их последующая ионизация электронным ударом, а также возможная ион-электронная рекомбинация при наличии молекулярных ионов. В работе [14] также отмечаются преимущественно отрицательные результаты в фиксации явления критической скорости ионизации для широкого круга космических экспериментов.

В следующем разделе представлены наиболее показательные результаты лабораторных стендовых экспериментов, которые также были исследованы в обзорах [11–13]. Основное внимание было уделено сравнительному анализу полученных экспериментальных данных и результатов расчетов по Альфвеновской теории как для чистых газов, так и для бинарных смесей. Также изложены дополнительные результаты, в значительной степени характеризующие проявление эффекта критической скорости ионизации.

2. Обзор публикаций

В работе (Fahleson U. V., 1960 [2]) представлено описание лабораторного эксперимента при помощи установки с вращающейся плазмой, оснащенной коаксиальными электродами, помещенными в магнитное поле (рис. 1). Эксперименты были выполнены для водорода и азота. Параметры стендовой установки представлены в табл. 1. В газовой среде зажигался электрический разряд, при этом ток на электродах и давление газа варьировались в широком диапазоне. Важным обнаруженным эффектом стала фактическая независимость напряжения между электродами от указанных параметров, которая фиксируется до определенного предела (рис. 2). По мнению автора статьи [2] резкий рост напряжения между электродами, проявляющийся при увеличении значения тока свыше 2 кА (для водорода) и 1 кА (для азота),

может быть объяснен за счет существования критической скорости ионизации, превышение которой приводит к сильному взаимодействию между плазмой и нейтральным газом. В работе [2] были также получены оценочные значения критической скорости для водорода ($\sim V_{crit}^H = 5.4 \times 10^4$ м/с) и азота ($\sim V_{crit}^N = 1.5 \times 10^4$ м/с). Эти значения достаточно близки к величинам критической скорости, которые предсказываются с использованием теории Альфвена [1]. Напряжение в разряде было пропорциональным величине напряженности магнитного поля. Фактически это был один из первых экспериментов, выполненных на установке однополярного типа.

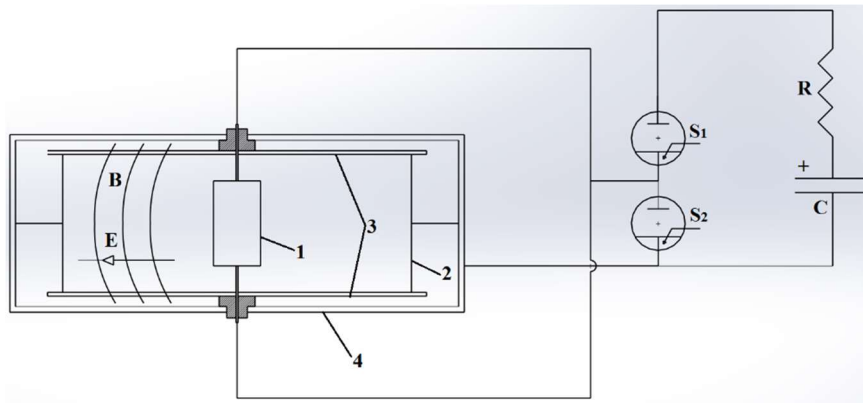


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [2]: S1, S2 – выпрямители, R – резистор, C – конденсаторная батарея, 1 – внутренний электрод, 2 – внешний электрод, 3 – изоляторы, 4 – вакуумный бак

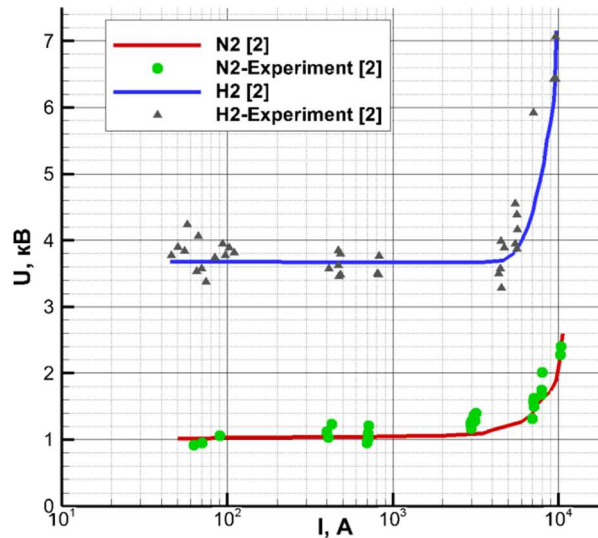


Рис. 2. Зависимость тока от напряжения в эксперименте [2] для водорода и азота

В статье (Danielsson L., 1970 [3]) изложены результаты экспериментального исследования взаимодействия между высокоскоростной плазменной струей (водорода) и неподвижным облаком нейтрального газа (гелия), которые были получены в комбинированной столкновительной установке, включающей часть для генерации плазмы (на основе конического тета-пинча), а также дрейфовую часть, в которой происходит ускорение вдоль магнитного поля, которое может достигать 0.5 Тл (рис. 3).

В данном эксперименте были выполнены оценки продольного изменения скорости плазмы. Отдельные измерения проводились с целью определения плотности потока протонов, электрического и магнитного поля, плотности нейтрального газа, электронной температуры и скорости плазмы, также распределения заряженных частиц, сформировавшегося в результате ионизации нейтрального газа.

Таблица 1

Параметры экспериментальной установки [2]

Параметр	Значение
Газ: водород, азот	
Давление газа, Торр	0.005 ÷ 0.2
Индукция магнитного поля, Тл	0.2 ÷ 1
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	20 ÷ 70
Сопротивление резистора, Ом	0 ÷ 200
Напряжение, кВ	5 ÷ 15
Диаметр внутреннего электрода, см	3
Диаметр внешнего электрода, см	20
Длина электродов, см	15

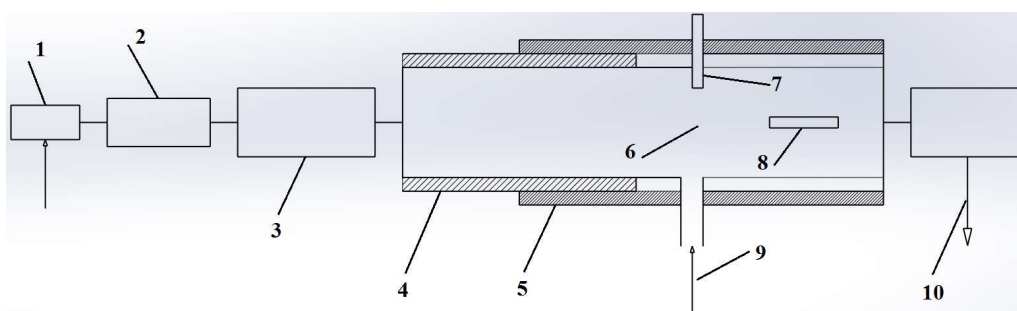


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки [3]: 1 – пусковой клапан, 2 – пред-разрядная катушка, 3 – основная разрядная катушка, 4 – катушка продольного магнитного поля, 5 – катушка поперечного магнитного поля, 6 – зона взаимодействия, 7, 8 – датчики, 9 – газовый клапан, 10 – вакуумный насос

В результате анализа распределения скорости по длине установки было обнаружено хорошее соответствие результатов эксперимента с гипотезой Альфвена – влияние магнитного поля проявляется в торможении плазмы до значений скорости, близкой к критической (рис. 4). Вместе с тем, автор работы [3] отмечает сложность определения единого механизма протекания всех зафиксированных в эксперименте физических процессов.

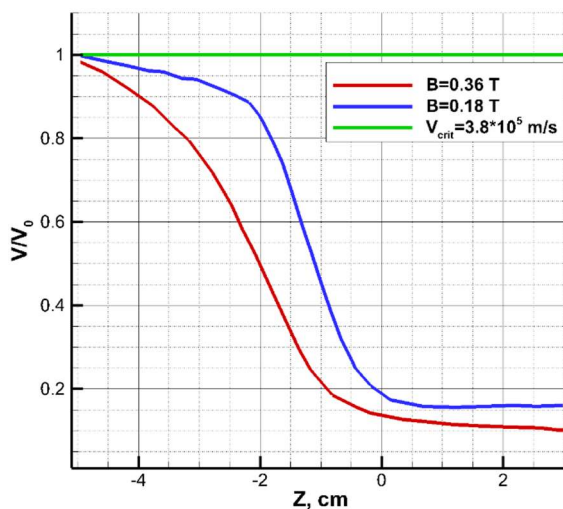


Рис. 4. Распределение скорости плазмы по длине экспериментальной установки [3]: V_{crit} – критическая скорость плазмы, V_0 – исходная скорость плазмы, V – скорость плазмы после торможения в магнитном поле

Продолжение экспериментальных исследований на комбинированной установке (см. рис. 3) включало в себя увеличение количества измеряемых параметров (Danielsson L., 1975 [4]). В частности, благодаря анализу результатов измерений поляризации испускаемых спектральных линий было определено распределение скорости электронов. Методика, основанная на взаимодействии ионного пучка с плазмой, также применялась для измерения плотности энергии электронов. Существенным результатом стало исследование нагрева электронов в ходе эксперимента, а также подтверждение необходимости наличия магнитного поля для организации взаимодействия между плазмой и нейтральным газом. Полученные результаты показывают, что полученное значение критической скорости (для гелия) достаточно близко к теоретическим расчетным данным [1].

В работе (Ахнас, 1978 [5]) исследование явления критической скорости ионизации было проведено для двухкомпонентных газовых смесей. При этом были рассмотрены следующие комбинации компонент смеси:

- группа компонент, имеющие близкий потенциал ионизации, но разные молекулярные массы (H_2-N_2 , H_2-O_2 , H_2-Ar и $He-Ne$);
- один компонент имеет существенно больший потенциал ионизации ($He-N_2$, $He-O_2$, $He-Ar$, H_2-He , H_2-Ne , $Ne-Ar$);
- молекулярная масса и потенциал ионизации компонент достаточно близки (N_2-Ar , O_2-Ar).

Цикл экспериментов был выполнен на плазменной пушке с азимутальным магнитным полем и радиальным током разряда. Основным результатом стало получение зависимости величины критической скорости ионизации от соотношения компонент смеси (например, рис. 5). Кроме того, была предложена модификация формулы (1) с целью ее обобщения на двухкомпонентную газовую смесь

$$V_{crit}^2 + \frac{1}{2}(1-\alpha)m_{II}V_{crit}^2 = \alpha eU_{ion}^I + (1-\alpha)eU_{ion}^{II}, \quad (2)$$

где $\alpha = V_I/(V_I + V_{II})$ – пропорциональная доля скорости образования ионов компоненты I; V_I, V_{II} – скорости образования ионов I-го и II-го сорта, m_I, m_{II} – массы I-й и II-й компоненты, U_{ion}^I, U_{ion}^{II} – потенциалы ионизации I-й и II-й компоненты.

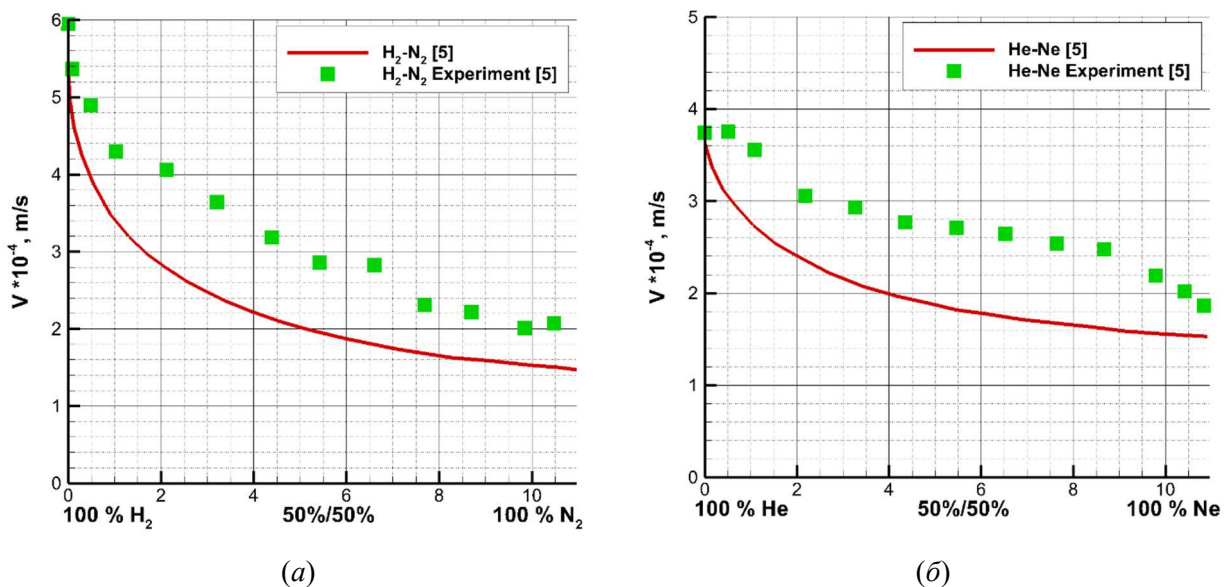


Рис. 5. Зависимость критической скорости ионизации от состава газовой смеси [5]: (а) H_2-N_2 , (б) $He-Ne$

По итогам рассмотренных лабораторных исследований [2–5] могут быть выделены следующие характерные параметры, оказывающие непосредственное влияние на проявление эффекта критической скорости ионизации: скорость плазмы, напряженность магнитного поля, плотность нейтрального газа. Обсуждение роли этих факторов приведено в статье (Brenning, 1988 [6]). В частности, было отмечено, что для различных типов экспериментов существует различное толкование критической скорости. В опытах с разрядом в качестве критической принимается установившееся значение скорости плазмы, а в столкновительных экспериментах – пороговое значение скорости. При этом именно экспериментальное значение пороговой скорости наилучшим образом соответствует аналитическому значению, получаемому по формуле (1). Также поднимался вопрос об ограничениях величины магнитного поля, при которой возможна аномальная ионизация газа. Как отмечается в работе [6] явление критической скорости ионизации имеет место, если скорость плазмы меньше Альфвеновской скорости V_A . Данная гипотеза хорошо сочетается с механизмом нагрева электронов, который основывается на плазменной неустойчивости [6]. При скоростях, превышающих Альфвеновскую, упомянутая неустойчивость подавляется за счет электромагнитных эффектов. Плотность нейтрального газа также должна соответствовать некоторым пороговым значениям, при которых обеспечивается эффективный энергообмен между плазмой и нейтральным газом

$$V_i/\omega_{gi} > 1, \quad (3)$$

$$V_i/\omega_{gi} > 2 \cdot (m_e/m_i)^{3/2} \cdot x^3, \quad (4)$$

где V_i – скорость ионизации; ω_{gi} – ионная циклическая частота; m_e – масса электрона; m_i – масса иона; x – параметр, характеризующий число временных масштабов роста неустойчивости, которое требуется для передачи энергии в плазменной струе. Формула (3) применяется для установившегося режима взаимодействия, а формула (4) для нестационарного энергообмена. На рис. 6 показаны кривые, отражающие степень эффективности обмена энергией при различных значениях плотности нейтрального газа. Анализ данных графиков позволяет оценить пороговые значения плотности нейтрального газа, при которых может быть реализован режим критической скорости ионизации.

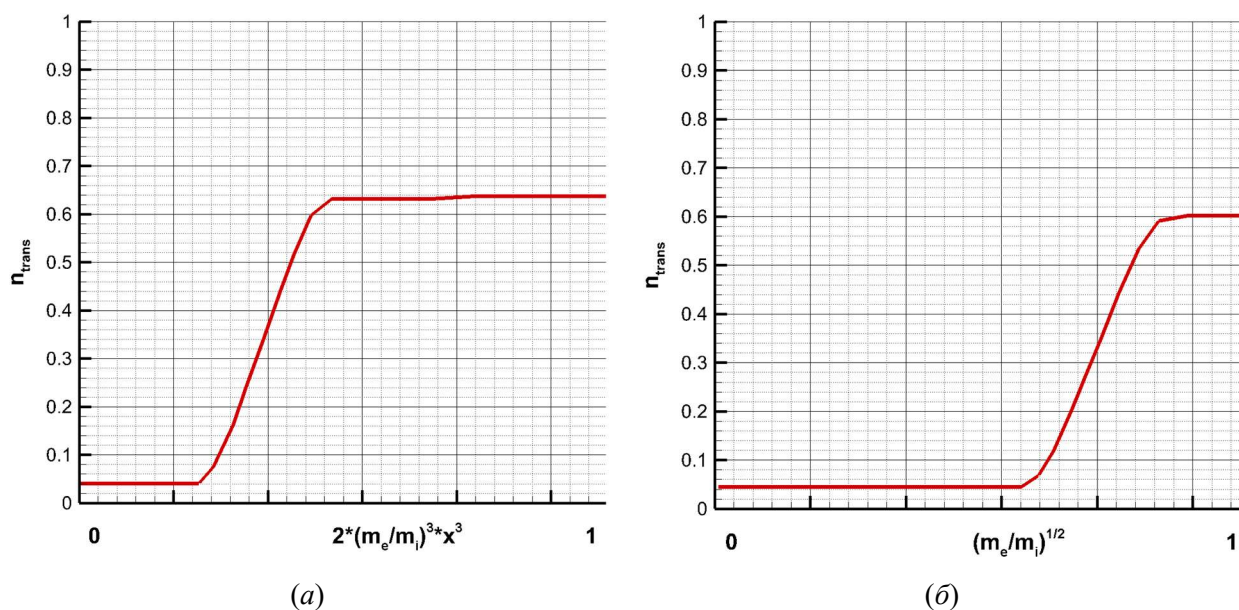


Рис. 6. Эффективность передачи энергии от плазмы к нейтральному газу в зависимости от плотности нейтрального газа для случая (а) нестационарного взаимодействия [6], (б) установившегося взаимодействия [6]

К началу 90-х годов были получены обширные экспериментальные результаты на различных стендовых установках. Вместе с тем, несмотря на исследование влияния на процесс аномальной ионизации различных экспериментальных параметров, возникали объективные сложности с детальным изучением внутренних физических процессов, что было обусловлено конструктивными особенностями лабораторных стендов: влиянием стенок и электродов, пространственной ограниченностью зоны взаимодействия плазмы и нейтрального газа в магнитном поле. В работе (Brenning, 1992 [7]) были изложены результаты обобщения данных стендовых исследований, которые подтверждают эффект критической скорости ионизации, а также резюмируют набор реализованных физических параметров (табл. 2).

Таблица 2

Некоторые критерии проявления эффекта критической скорости ионизации [7]

Параметры и доверительный интервал	Физическое обоснование	Верификация
Скорость		
$V_0 > V_{crit}$ $\pm 50 \%$	Энергетический запас	Значительное число лабораторных испытаний, а также численные исследования
Магнитное поле		
$V_A > 3V_0$ Коэффициент 2–3	Неустойчивости, за счет которых обеспечивается передача энергии к электронам (modified two stream instability, MTSI)	Небольшое число лабораторных экспериментов и незначительное число расчетных исследований
Плотность нейтрального газа		
$\int n_n dz > \frac{V_{crit}}{\langle \sigma_i V_e \rangle}$, V_e – скорость электронов, σ_i – сечение столкновений, n_n – плотность нейтрального газа	Критерий Таунсенда для самостоятельного разряда	Незначительное число лабораторных экспериментов и расчетных исследований
$V_i/\Omega_i > 1$, стационарный процесс $V_i/\Omega_i > 0.1$, нестационарный процесс Ω_i – ионная частота	Критерий лучевой неустойчивости	

Дополнительные возможности более детального исследования процессов в зоне взаимодействия плазменной струи и облака нейтрального газа открываются при проведении космических экспериментов. В работе (Haerendel 1982, [8]) были представлены результаты эксперимента по инъекции струи бария в верхних слоях ионосферы. Ключевым итогом стало частичное подтверждение существования критической скорости ионизации, но со значительно более низким по сравнению с лабораторными исследованиями эффектом – прирост скорости ионизации составил порядка 30 %. В данной работе также отмечается роль плазменных неустойчивостей, обеспечивающий эффективный нагрев электронов. В обзорной работе (Newel 1985, [9]) сделано допущение о роли перезарядки как возможного механизма критической скорости ионизации. Вместе с тем данные исследования спутника Юпитера Ио [9], показывают крайне низкую эффективность передачи энергии электронам. Анализ результатов космического эксперимента CRIT-II, который состоял в инъекции струи бария в ионосфере при скорости порядка 13.5 км/с, был опубликован в работе (Volin 1996, [10]). Несмотря на отсутствие заметного повышения скорости ионизации основным достижением данного

эксперимента следует считать реализацию прямых измерений волновых и спектральных характеристик непосредственно в зоне столкновения.

Специфика постановки задачи об исследовании аномальной ионизации подразумевает проведение экспериментов с газовым разрядом в магнитном поле. Таким образом, возникает естественный вопрос о возможности реализации такого физического явления в Пеннинговском разряде. В работах [15–16] были выполнены расчеты, показывающие определенные качественные признаки возможного проявления критической скорости ионизации в аргоне [15] и азоте [16]. Однако в работе [15] полученные значения характерной скорости существенно ниже соответствующих значений критической скорости, несмотря на определенное повышение скорости ионизации. Очевидно, что данный вопрос требует дополнительных исследований.

3. Заключение

В данной статье представлен обзор работ по экспериментам, ориентированным на изучение явления критической скорости ионизации. Среди рассмотренных публикаций представлены как результаты лабораторных экспериментов, так и данные космических исследовательских проектов. Следует отметить, что если в лабораторных условиях удалось однозначно зафиксировать аномальную ионизацию, то в космическом пространстве воспроизведение этого эффекта сопряжено со значительными трудностями. В представленных работах затрагиваются вопросы об оценке степени влияния на ускорение ионизации следующих параметров: скорости плазмы, напряженности магнитного поля, плотности нейтрального газа, время взаимодействия. Упоминаются два основных возможных механизма нагрева электронов, каждый из которых основывается на различных типах плазменных неустойчивостей. Открытым вопросом остается возможность получения аномальной ионизации в разряде Пеннинга.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФ 22-11-00062.

Литература

1. Alfvén H. On the Origin of the Solar System. Oxford University Press. Oxford. England. 1954.
2. Fahleson U. V. Experiments with plasma moving through neutral gas // The Physics of Fluids. 1961. Т. 4. № 1. С. 123–127.
3. Danielsson L. Experiment on the interaction between a plasma and a neutral gas // The Physics of Fluids. 1970. Т. 13. № 9. С. 2288–2294.
4. Danielsson L., Brenning N. Experiment on the interaction between a plasma and a neutral gas. II // The Physics of Fluids. 1975. Т. 18. № 6. С. 661–671.
5. Axnäs I. Experimental investigation of the critical ionization velocity in gas mixtures // Astrophysics and Space Science. 1978. Т. 55. № 1. С. 139–146.
6. Brenning N., Axnäs I. Critical ionization velocity interaction: Some unsolved problems // Plasma and the Universe. Springer, Dordrecht, 1988. С. 15–30.
7. Brenning N. A comparison between laboratory and space experiments on Alfvén's CIV effect // IEEE transactions on plasma science. 1992. Т. 20. № 6. С. 778–786.
8. Haerendel G. Alfvén's critical velocity effect tested in space // Zeitschrift für Naturforschung A. 1982. Т. 37. № 8. С. 728–735.
9. Newell P. T. Review of the critical ionization velocity effect in space // Reviews of Geophysics. 1985. Т. 23. № 1. С. 93–104.
10. Bolin O. et al. CRIT II electric and magnetic observations inside and outside an ionizing neutral jet // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1996. Т. 101. № A9. С. 19729–19744.
11. Danielsson L. Review of the critical velocity of gas-plasma interaction // Astrophysics and Space Science. 1973. Т. 24. № 2. С. 459–485.

12. Brenning N. Review of impact experiments on the critical ionization velocity. KTH Royal Institute of Technology, 1982.
13. Piel A. Review of laboratory experiments on Alfvén's critical ionization velocity // *Advances in space research*. 1990. Т. 10. № 7. С. 7–16.
14. Lai S. T. A review of critical ionization velocity // *Reviews of Geophysics*. 2001. Т. 39. № 4. С. 471–506.
15. Tyushev M., et al. Azimuthal structures and turbulent transport in Penning discharge // arXiv preprint arXiv:2210.16887. 2022.
16. Суржиков С. Т. О возможности использования разряда Пеннинга для изучения явления критической скорости ионизации // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2022. Т. 23, вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-5/articles/1021/>
<http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1021>

References

1. Alfvén H., *On the Origin of the Solar System*, Oxford University Press. Oxford. England. 1954.
2. Fahleson U. V., Experiments with plasma moving through neutral gas, *The Physics of Fluids*, 1961, vol. 4, no. 1, pp. 123–127.
3. Danielsson L., Experiment on the interaction between a plasma and a neutral gas, *The Physics of Fluids*, 1970, vol. 13, no. 9, pp. 2288–2294.
4. Danielsson L., Brenning N., Experiment on the interaction between a plasma and a neutral gas. II, *The Physics of Fluids*, 1975, vol. 18, no. 6, pp. 661–671.
5. Axnäs I., Experimental investigation of the critical ionization velocity in gas mixtures, *Astrophysics and Space Science*, 1978, vol. 55, no. 1, pp. 139–146.
6. Brenning N., Axnäs I., Critical ionization velocity interaction: Some unsolved problems, *Plasma and the Universe*, Springer, Dordrecht, 1988, pp. 15–30.
7. Brenning N., A comparison between laboratory and space experiments on Alfvén's CIV effect, *IEEE transactions on plasma science*, 1992, vol. 20, no. 6, pp. 778–786.
8. Haerendel G., Alfvén's critical velocity effect tested in space, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1982, vol. 37, no. 8, pp. 728–735.
9. Newell P. T., Review of the critical ionization velocity effect in space, *Reviews of Geophysics*, 1985, vol. 23, no. 1, pp. 93–104.
10. Bolin O., et al., CRIT II electric and magnetic observations inside and outside an ionizing neutral jet, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, vol. 101, no. A9, pp. 19729–19744.
11. Danielsson L., Review of the critical velocity of gas-plasma interaction, *Astrophysics and Space Science*, 1973, vol. 24, no. 2, pp. 459–485.
12. Brenning N., *Review of impact experiments on the critical ionization velocity*, KTH Royal Institute of Technology, 1982.
13. Piel A., Review of laboratory experiments on Alfvén's critical ionization velocity, *Advances in space research*, 1990, vol. 10, no. 7, pp. 7–16.
14. Lai S. T., A review of critical ionization velocity, *Reviews of Geophysics*, 2001, vol. 39, no. 4, pp. 471–506.
15. Tyushev M., et al., *Azimuthal structures and turbulent transport in Penning discharge*, arXiv preprint arXiv:2210.16887, 2022.
16. Surzhikov S. T., On the Possibility of Using the Penning Discharge to Study the Phenomenon of the Critical Ionization Velocity, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 5 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-5/articles/1021/>
<http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1021>