

## ВМЕСТО НЕКРОЛОГА ОБ УВЛЕЧЕНИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА ИМПУЛЬСОМ ТОКА В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

Г. А. Аскарьян, А. А. Рухадзе

*Приведен расчет увлечения нейтрального газа высокого давления импульсом тока в слабоионизованной плазме, предсказанного одним из авторов (Г. А. А.). Показано, что подобное увлечение газа возможно и при инъекции импульсных релятивистских электронных пучков в плазму, как следствие протекания индуцированного обратного тока.*

Ушел из жизни Г. А. Аскарьян, один из талантливейших физиков нашего времени, физик-универсал, физик от Бога. Он признавал в физике только эффекты, предсказывал их, давал им простую и наглядную интерпретацию. Много лет назад Г. А. Аскарьян попросил меня выявить условия, когда относительная ширина ионного циклотронного резонанса в плазме для элементов в середине периодической системы Менделеева будет  $\lesssim 1\%$ . В результате появилась широко цитируемая наша совместная работа по ионному циклотронному разделению изотопов [1]. Это была его идея и мой расчет.

Настоящая работа родилась таким же образом – он попросил оценить увлечение нейтрального газа коротким импульсом тока в слабоионизованной плазме. Я рассчитал такой эффект и отдал ему свои бумаги еще осенью. Недавно он мне сказал, что приступает к написанию статьи и нам надо встретиться. Это было пятого февраля вечером. Наша встреча оказалась последней. Он был очень плох, разговор не состоялся. Мы его отправили домой. Больше я его не видел ни живым, ни мертвым.

Бумаги мои нашлись, его оценки тоже, а также несколько строк рукописи, по-видимому, начало статьи. Больше, к сожалению, ничего. И вот я написал статью,

умышленно незаконченную, Гурген Ашотович ее не закончил. И если читатель задумается над статьей, над сделанными мною выводами и сам увидит больше чем я – значит, цель достигнута. Может быть, я смог передать мысли Гургена Ашотовича.

Пусть через слабоионизованный газ атмосферного давления протекает импульс тока  $J_0(t)$ , поддерживаемый полем  $E_0(t)$ ,

$$J_0(t) = J_0 e^{-t/\tau}, \quad E_0(t) = E_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

причем для ориентировки примем  $J_0 \simeq 10 \text{ кА}$ ,  $E \simeq 3 \text{ кВ/см}$  и  $\tau \simeq 10^{-6} \text{ с}$ . Такие параметры характерны для установки "ФОТОН" (Физфак МГУ), генерирующей сильнооточный импульсный разряд в газе атмосферного давления. Радиус токового канала  $r_0 \sim 1 \text{ см}$ , длина разрядного промежутка  $l \approx 20 \text{ см}$ .

Рассчитать увлечение нейтрального газа при протекании импульсного тока через слабоионизованную плазму можно, исходя из системы одномерных уравнений движения электронов, нейтрального газа и закона Джоуля – Ленца:

$$m \frac{dv_e}{dt} = eE_0 - m\nu_e v_e \approx 0, \quad M_0 \frac{dv_0}{dt} = \frac{n_e}{n_0} m\nu_e v_e,$$

$$\frac{d}{dt} [n_e(T_e + T_i) + n_0 T_0] = \frac{e^2 n_e}{m\nu_e} E_0^2(t). \quad (2)$$

Здесь  $n_e = n_i$  и  $n_0$  – плотности электронов, ионов и нейтральных частиц,  $T_e$ ,  $T_i$  и  $T_0$  – их температуры,  $v_e$  и  $v_0$  – скорости направленного движения электронов и нейтральных частиц, массы которых, соответственно,  $m$  и  $M_0$ , а  $\nu_e$  – частота электрон-нейтральных столкновений. При этом в (2) учтено, что направленная скорость электронов в поле  $E_0(t)$ ,

$$v_e \approx \frac{eE_0(t)}{m\nu_e} \quad (3)$$

намного превосходит скорость  $v_0$ , а длительность импульса  $\tau \gg \nu_e^{-1}$ . Более того, мы будем считать, что и время выравнивания температур электронов  $T_e$  и нейтральных частиц  $T_0$  намного меньше времени импульса, т.е.  $\delta \nu_e \tau \gg 1$ , где  $\delta \approx 10^{-2} - 10^{-3}$  для воздуха, а  $\nu_e \approx 3 \cdot 10^9 P_0 \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ ;  $P_0$  – давление нейтрального газа в торрах.

Из последнего уравнения системы (2) находим установившуюся температуру нейтрального газа и электронов в разряде<sup>1</sup>

$$T_{\infty} \approx \frac{e^2 n_e}{2m\nu_e} \frac{\tau}{n_0} E_0^2. \quad (4)$$

Второе же уравнение системы (2) позволяет найти установившуюся скорость нейтрального газа

$$v_{\infty} \approx \frac{en_e}{M_0 n_0} \tau E_0. \quad (5)$$

Легко показать, что при указанных выше ограничениях направленная скорость газа  $v_{\infty}$  всегда меньше его тепловой скорости  $v_T$

$$\frac{v_{\infty}}{v_T} \approx \sqrt{2 \frac{mn_e}{M_0 n_0} \nu_e \tau} \ll 1. \quad (6)$$

Малость этого отношения, в частности, обеспечивается низкой степенью ионизации газа, поскольку согласно формуле Саха

$$\frac{n_e}{n_0} \approx \exp\left(-\frac{I}{2T_{\infty}}\right) \ll 1, \quad (7)$$

где  $I \approx 10 \text{ эВ}$  – средний потенциал ионизации атомов газа.

Прежде всего проведем численные оценки для указанных выше параметров импульса тока в газе атмосферного давления. Из (4) и (7) получаем следующие оценки для воздуха:  $T_{\infty} \approx 0,1I \approx 10^4 \text{ К}$ ,  $n_e/n_0 \lesssim 7 \cdot 10^{-3}$ . Согласно (5) и (6),  $v_T \approx 10^5 \text{ см/с}$ ,  $v_{\infty}/v_T \lesssim 10^{-1}$ , или  $v_{\infty} \approx 10^4 \text{ см/с}$ . Это довольно высокая скорость увлечения, и она вполне наблюдаема экспериментально на установке "ФОТОН". Вместе с тем, следует заметить, что приведенные оценки несколько завышены, поскольку не учитывают потери, обусловленные излучением из разряда, которые могут оказаться существенными при  $T_{\infty} > 10^4 \text{ К}$ .

Заметим также, что увлечение нейтрального газа с такими же параметрами можно наблюдать и при инжекции сильноточных импульсных релятивистских электронных пучков в газы высокого давления, например, пучка, генерируемого на установке "ТЕРЕК" (ИОФАН). Параметры этого пучка следующие: ток пучка  $\approx 10 \text{ кА}$ , энергия электронов  $\approx 0,5 \text{ МэВ}$ , длительность импульса  $\approx 10^{-6} \text{ с}$  и радиус пучка  $2 \text{ см}$ . При

<sup>1</sup>Здесь мы пренебрегли ионной температурой, поскольку в процессе установления равновесия она всегда меньше электронной температуры, а после установления равновесия вкладом ионов и электронов в тепловую энергию можно пренебречь.

инжекции такого пучка в воздух атмосферного давления генерируется плазма с плотностью до  $n_p \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и степенью ионизации порядка  $n_p/n_0 \approx 10^{-3}$ . Возникающий обратный ток за время импульса пучка не успевает значительно затухнуть, а поэтому скорость обратных электронов порядка  $10^6 \text{ см/с}$ , или эффективное индуцируемое в плазме электрическое поле  $\approx 10 \text{ кВ/см}$ , т.е. такого же порядка, как в разряде на "ФОТОНЕ". В результате скорость увлечения нейтрального газа обратным плазменным током также оказывается порядка  $v_\infty \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см/с}$  (при  $v_T \approx 10^6 \text{ см/с}$ ). Заметим, что эта скорость направлена против пучка, в сторону обратного тока, что значительно облегчает экспериментальное наблюдение эффекта.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аскарьян Г. А., Намиот В. А., Рухадзе А. А. Письма ЖТФ, 1, N 18, 820 (1975).

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 28 марта 1997 г.

**ГУРГЕН АШОТОВИЧ АСКАРЬЯН**  
(1928 – 1997)



Второго марта 1997 года от сердечной болезни трагически умер Гурген Ашотович Аскар'ян, доктор физико-математических наук, действительный член Российской академии естественных наук, лауреат Ленинской премии, ведущий научный сотрудник Института общей физики РАН.

Г. А. Аскар'ян был выдающимся физиком, работы которого обогатили многие разделы физической науки. Он был одинаково силен и в теории, и в эксперименте.

Его товарищи по обучению в Московском государственном университете вспоминают, что в конце 40-х годов, еще студентом, он предложил новый способ детектирования быстрых заряженных частиц с использованием перегретой жидкости. В то время его предложение не встретило поддержки, но позднее та же самая идея была независимо выдвинута и с успехом реализована американским физиком Д. А. Глезером. Созданное им устройство – пузырьковая камера – прочно вошло в арсенал ядерной физики и принесло своему создателю Нобелевскую премию по физике.

Последующие работы Г. А. Аскарьяна принесли ему мировое признание, которое он в полной мере заслужил. Он опубликовал около 230 научных работ, которые покрывают почти все области современной физики. В числе его наиболее важных достижений упомянем так называемую "самофокусировку" мощных волновых пучков, предсказанную им в 1962 году и представляющую собой один из основных эффектов нелинейной оптики, нелинейной акустики и вообще нелинейной физики. Его исследование акустических и электромагнитных явлений, сопровождающих широкие атмосферные ливни космического излучения, привело к созданию глобальной системы детектирования космических лучей и нейтринных потоков.

Г. А. Аскарьян был одним из наиболее известных в мире физиков, изучающих взаимодействие лазерного излучения с веществом. Полученные им результаты позволили понять широкий круг явлений, относящихся к этой проблеме.

Г. А. Аскарьян исследовал также биологические последствия воздействия лазерных излучений на ткани человеческого организма, а также экологические эффекты, сопровождающие мощное электромагнитное излучение. Его недавние исследования, в частности, работы по использованию лазерного излучения для уничтожения нефтяных загрязнений, а также для восстановления озонового слоя, определяют направление дальнейших исследований на многие годы.

Приводя этот краткий и неполный список достижений Г. А. Аскарьяна, мы хотим только дать представление о том, как много он сделал и как важно то, что он сделал.

Его интересы не исчерпывались только физикой. Он любил и прекрасно знал живопись, как современную, так и классическую, был знаком со многими живописцами. Он был книголюбом и проводил много времени в походах по книжным лавкам и букинистическим магазинам, разыскивая интересовавшие его книги. Эти интересы Г. А. Аскарьяна не отгораживали его от людей – он любил рассказывать и о живописи, и о редких книгах, и еще о многом. Он был великолепным рассказчиком, глубоким и остроумным, его слушали с большим вниманием и в полной тишине. И в науке, и в жизни

он имел острый и независимый взгляд на явления и события.

Он был борец по натуре и нередко отстаивал свои взгляды в острых дискуссиях как по научным вопросам, так и по вопросам этики в науке и в жизненных ситуациях.

На его попечении находилась тяжелобольная сестра, за которой он ухаживал с трогательной самоотверженностью. Его приглашали на многие физические конференции в стране и за рубежом, но он никогда не принимал приглашений, не желая оставить сестру на чужих руках даже на малое время. Напряженная научная работа и тяжелая домашняя нагрузка были на пределе его сил.

В последние годы он плохо себя чувствовал, но к врачам не обращался и не снижал усилий в науке и в домашних заботах, хотя знал, что его жизненные силы на исходе, и приготовился к концу. Он был найден мертвым в своей квартире. Там же было найдено и тело его сестры. Экспертиза дала заключение, что они умерли в один день.

Трагическая смерть Гургена Ашотовича Аскарьяна – тяжелая потеря для науки и для всех, кто имел счастье его знать.

Г. М. Батанов, Б. М. Болотовский, Ю. Н. Вавилов, С. С. Герштейн, О. Н. Крохин,  
Е. Л. Фейнберг