

ВЛИЯНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА РАДИАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ ГАЗА ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА

А.Г. МКРТЧЯН, Г.Ф. ХАЧАТРЯН, Л.Ш. ГРИГОРЯН,
Г.А. АРУТЮНЯН, Л.Э. ХАЧИКЯН, А.Р. АРАМЯН*

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: aramyan.artur@gmail.com

(Поступила в редакцию 7 июля 2022 г.)

Экспериментально показано, что увеличение интенсивности стоячей звуковой волны в разрядной трубке приводит к уменьшению температуры газа на оси положительного столба разряда аргона и росту температуры газа на стенке трубки вследствие возникновения вихревого движения в поле звуковой волны. При этом уменьшается радиальный перепад температур по радиусу положительного столба.

1. Введение

Плазма, с которой мы сталкиваемся в природе или в лабораторных условиях, характеризуется параметрами, отличающимися в различных случаях на много порядков. Большой научный и практический интерес представляет исследование распределения заряженных частиц, в частности, электронов по радиусу положительного столба тлеющего разряда. Ведь именно по форме профиля радиального распределения концентрации электронов на оси положительного столба, можно судить о степени сжатия разряда или наоборот, о степени однородности заполнения разрядом трубки.

Взаимодействие акустических волн с заряженными частицами исследуется долгое время и имеется большое количество опубликованных работ. Эти работы можно разделить на два направления. Первое направление — воздействие акустических волн на совокупность заряженных частиц или на плазму. К ним относятся, например, влияние на такие параметры плазмы, как напряженность электрического поля внутри плазмы, распределение концентрации заряженных частиц, которое тесно связано с температурой газа [1,2]. Акустические волны также могут воздействовать на совокупность заряженных частиц и вызывать излучение электромагнитных волн в различных диапазонах — от УНЧ до светового [3–5]. Второе направление — влияние плазмы на параметры акустических волн, например, усиление звука и неустойчивости в плазме [6].

В настоящей работе приведены экспериментальные результаты исследования градиента температуры в газоразрядной плазме.

2. Эксперимент и результаты

При исследовании взаимодействия звуковых волн с плазмой самым непредсказуемым результатом оказалось значительное уменьшение температуры газа в плазме звуком. Явление уменьшения температуры газа в разряде под влиянием звуковой волны может оказать положительное воздействие на работу газоразрядных лазеров. В частности, следует отметить, что эффективность работы лазеров на углекислом газе в значительной степени зависит от температуры газа в разряде. Для поддержания высокой степени инверсии в активной среде CO_2 — лазеров температура газа должна быть достаточно низкой, лазерная мощность резко снижается, и при $T > 600\text{--}650\text{ К}$ генерация с ростом температуры вообще прекращается [7]. Обеспечение достаточно быстрого теплоотвода является необходимым условием работы лазера на углекислом газе. При постоянном разрядном токе и давлении газа в камере уменьшение температуры газа приводит к повышению коэффициента полезного действия и мощности излучения лазера. Рассмотренный здесь способ уменьшения температуры газа в разряде может быть достаточно эффективно использован для увеличения мощности излучения в существующих лазерах и при проектировании новых.

Измерения температуры газа выполнялись по схеме, приведенной на рис.1. Температура газа измерялась двумя термопарными датчиками с кварцевым защитным покрытием. Датчики располагались на стенке и на оси трубки на расстоянии 15 см от анода. Э.д.с. от термопар измерялась измерительным контролёром для термопарных датчиков.

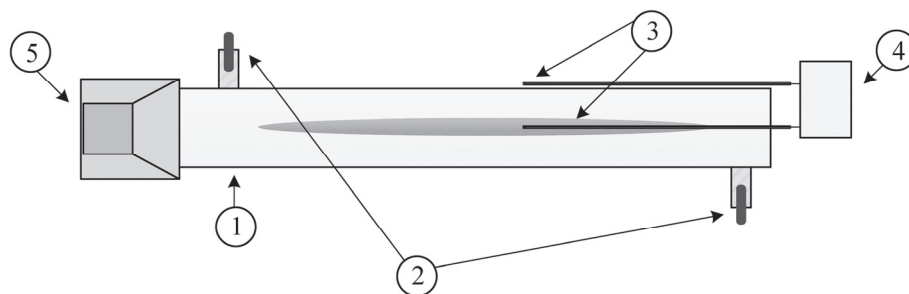


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – кварцевая разрядная трубка, 2 – электроды, 3 – термопарные датчики, 4 – измерительный контроллер для термопарных датчиков, 5 – Излучатель акустических волн.

Экспериментальные исследования показывают, что создание звуковой волны резонансной частоты в разряде аргона приводит к уменьшению температуры газа на оси положительного столба, т.е. звуковая волна приводит к охлаждению газа.

С ростом интенсивности звука, как видно из рис.2 и рис.3, эффект охлаждения газа звуком на оси ПС проявляется сильнее. На рис.2 кривые 1 и 2 характеризуют изменение температуры газа на оси разряда, 3 и 4 — на стенке трубки. Кривые 1 и 3 получены при давлении аргона в трубке 110 мм рт. ст. и разрядном

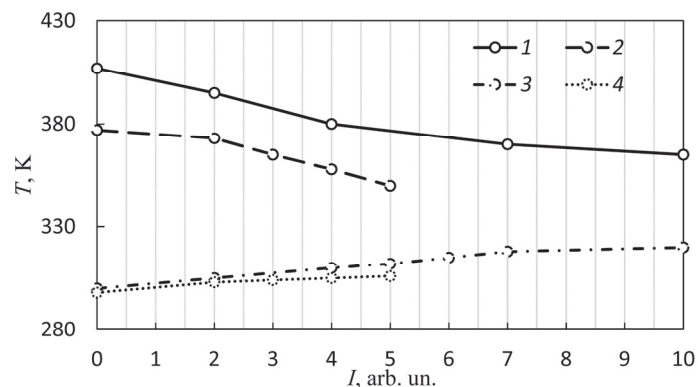


Рис.2. Графики зависимости температуры газа от интенсивности звука, при постоянном разрядном токе 60 мА: 1 — на оси разряда при давлении 110 мм рт. ст., 2 — 60 мм рт. ст., 3 — на стенке трубки при давлении 110 мм рт. ст., 4 — 60 мм рт. ст.

токе в отсутствие звука 60 мА, температура газа на оси разряда уменьшается от 407 до 365 К при увеличении интенсивности звука до 85 дБ, температура на стенке трубки при этом повышается на 20°. Кривые 2 и 4 — при 60 мм рт. ст. и токе 60 мА.

На рис.3 представлены зависимости температуры газа на оси разряда и стенке трубки от интенсивности звука при частоте 190 Гц, давлении аргона в трубке 110 мм рт. ст. и постоянном разрядном токе. Кривые 1 и 3 получены при постоянном разрядном токе 90 мА во всем диапазоне измерения интенсивности звука. Кривые 2 и 4 — при 60 мА. Из графиков следует, что температура газа на оси при токе 90 мА уменьшилась с 432 до 390 К, а при 60 мА с 403 до 360 К. На стенке трубки при разрядном токе 90 мА температура повышается от 305 до 335 К, а при 60 мА от 308 до 320 К. Таким образом, перепад температур газа между осью разряда и стенкой трубки под влиянием звуковой волны уменьшается при разрядном токе 90 мА, с 127 до 55° т.е. в 2.3 раза, а в случае 60 мА с 75

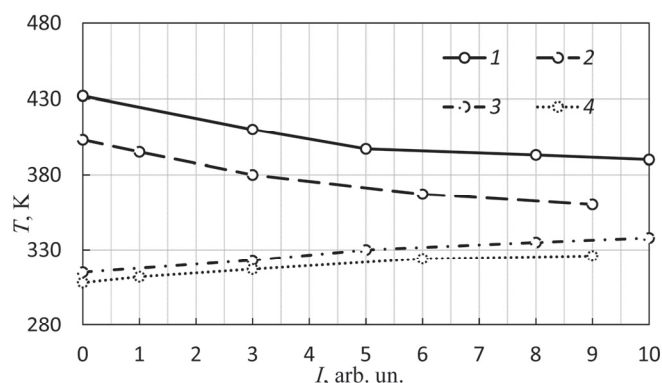


Рис.3. Графики зависимости температуры газа от интенсивности звука при давлении аргона в трубке 110 мм рт. ст.: 1 — на оси разряда при токе 90 мА, 2 — на оси при 60 мА, 3 — на стенке трубки при токе 90 мА, 4 — на стенке трубки при 60 мА.

до 40° т.е. в 1.9 раза. Зависимости перепада температур ΔT между осью и стенкой разрядной трубки от интенсивности звука, построенные из рис.2 и рис.3, представлены на рис.4, рис.5 и рис.6. Кривая 1 на рис.4 соответствует давлению 110 мм рт. ст., 2 — 80 мм рт. ст., 3 — 60 мм рт. ст.

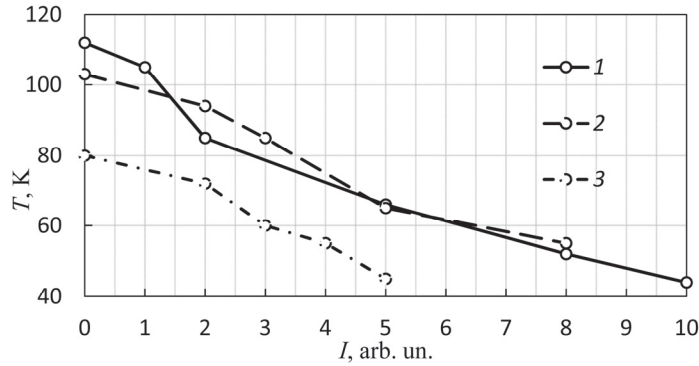


Рис.4. Зависимости разности температуры ΔT между осью и стенкой разрядной трубки от интенсивности звука. Кривые: 1 — давление 110 мм рт. ст., 2 — 80 мм рт. ст., 3 — 60 мм рт. ст. Температура на оси: 1 — 407 К, 2 — 403 К, 3 — 360 К. Разрядный ток 60 мА.

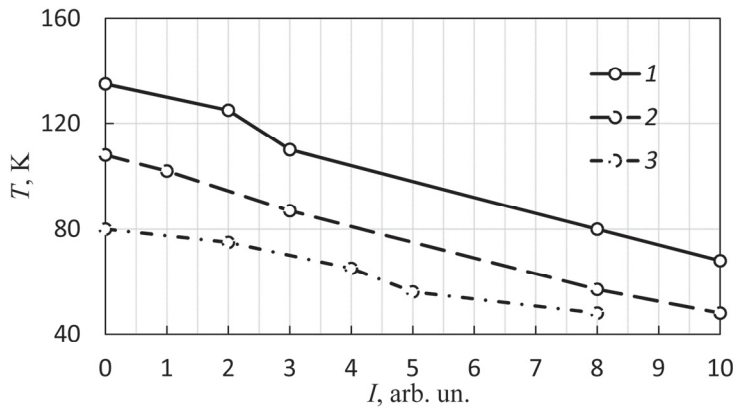


Рис.5. Зависимости разности температуры ΔT между осью и стенкой разрядной трубки от интенсивности звука. Кривые: 1 — разрядный ток 90 мА, 2 — 60 мА, 3 — 30 мА. Температуры на оси: 1 — 449 К, 2 — 408 К, 3 — 373 К. Давление газа 110 мм рт. ст.

Температура на оси в разряде без звука составляла: кривая 1 — $T_0 = 407$ К, 2 — $T_0 = 403$ К, 3 — $T_0 = 380$ К. Разрядный ток $I_p = 60$ мА. Как видно из графиков, с ростом интенсивности звуковой волны ΔT падает. Уменьшение ΔT в поле звуковой волны проявляется сильнее с ростом давления. Такое поведение градиента температуры газа в поле звуковой волны с повышением давления в разряде, по-видимому, можно объяснить тем, что поперечная неоднородность плазменного столба с ростом P усиливается, что приводит к более сильному проявлению акустического течения [8].

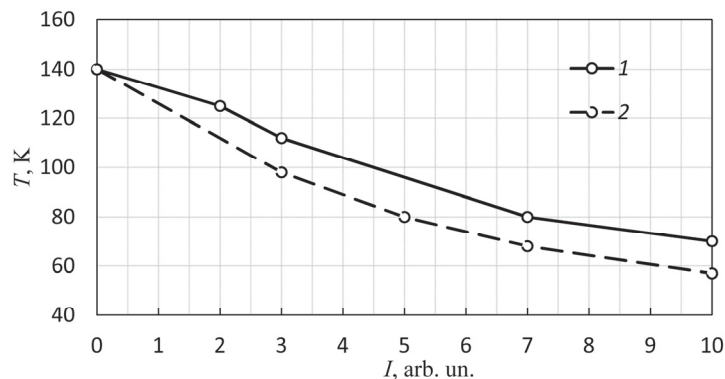


Рис.6. Зависимости разности температуры ΔT между осью и стенкой разрядной трубки от интенсивности звука. Кривые: 1 — разрядный ток 90 мА, $P = 110$ мм рт. ст., $T_0 = 449$ К; 2 — 90 мА (без звука), $P = 110$ мм рт. ст., $T_0 = 433$ К, $W \sim 250$ Вт.

В подтверждение к этому на рис.5 приведены графики зависимости ΔT от интенсивности звука для разных значений разрядного тока: 1 — 90 мА, $P = 110$ мм рт. ст., $T_0 = 449$ К; 2 — 60 мА, $P = 110$ мм рт. ст., $T_0 = 408$ К; 3 — 30 мА, $P = 110$ мм рт. ст., $T_0 = 373$ К. Из рис.5 видно, что при токе 90 мА уменьшение с ростом интенсивности звука проявляется сильнее, чем при токе 30 мА.

На рис. 6 приведены зависимости разности температуры между осью разрядной трубки и стенкой от интенсивности звука. Кривая 1 для условий, когда разрядный ток $I_p = 90$ мА и давление газа $P = 110$ мм рт. ст. поддерживаются постоянными, температура газа без звука $T_0 = 449$ К, кривая 2 соответствует условию, когда вкладываемая в разряд мощность поддерживается постоянной ($W \sim 250$ Вт), I_p и T_0 в разряде без звука соответственно 90 мА и 449 К. Как видно из приведенного рисунка, эффект уменьшения градиента температуры газа в поле звуковой волны наблюдается как в условиях, когда разрядный ток поддерживается постоянным, так и в случае, когда поддерживается неизменной мощность, вкладываемая в разряд. Можно говорить о сильно выраженном механизме охлаждения газа звуком при этих условиях.

3. Обсуждение

Механизм, объясняющий охлаждение газа звуком, основан на вихревом движении газа (акустическом течении). По своей природе акустическое течение - это медленное регулярное вихревое движение среды на фоне быстрого колебательного движения в звуковой волне, т.е. характерный временной период τ_s вихревого движения в акустическом ветре много меньше периода волны $1/\omega$: $\tau_s \ll 1/\omega$. Возможность образования акустического ветра в стоячей волне связана с поперечной неоднородностью акустического поля. В разрядной трубке неоднородность акустического поля образуется, во-первых, из-за сильного температурного градиента вдоль радиуса трубки и, во-вторых, из-за пограничного слоя около стенок,

где скорость движения уменьшается от значения в звуковой волне до нуля вблизи стенок. Во втором случае эффективный потенциал действует только в пограничном слое, создавая в нем акустическое течение, а последнее из-за вязкого трения на границе пограничного слоя возбуждает течение в остальной части трубки с той же продольной скоростью течения. В условиях нашего эксперимента скорость такого течения $U_0 \sim 10^{-6}$ см/с, что не может привести к увеличению процессов переноса. Таким образом, образование заметного акустического ветра возможно только за счет сильного температурного градиента вдоль радиуса трубки. Образование акустического течения, т.е. вихревого потока в среде в поле стоячей неоднородной звуковой волны, открывает дополнительный канал переноса частиц и энергии вдоль радиуса трубки.

Таким образом, уменьшение температуры газа на оси разряда можно объяснить возникновением стационарного вихревого движения в разряде в поле звуковой волны. Наличие такого движения приводит к перемешиванию газа по сечению трубки, сопровождаемому уменьшением радиального градиента температуры газа. Уменьшение радиального градиента температуры газа, при фиксированном давлении, вследствие зависимости $P = NkT$ приведет к более однородному распределению плотности газа по радиусу положительного столба. При этом более однородным будет также распределение параметра E/N , определяющего основные характеристики разряда, по радиусу трубки. Вследствие этого уменьшится также неоднородность распределения концентрации электронов по сечению положительного столба, т.е. возрастает диаметр видимой границы положительного столба [9]. Все это признаки расщуривания разряда, что и наблюдается на эксперименте.

В силу нелинейной связи n_e и T должно происходить также изменение других параметров разряда, таких как проводимость, ток и напряжение, что также наблюдается экспериментально при создании звуковой волны в разряде.

4. Заключение

Учитывая сделанные в данной работе обсуждения и приведенные результаты, можно сделать следующие выводы:

Экспериментально показано, что увеличение интенсивности стоячей звуковой волны в разрядной трубке приводит к уменьшению температуры газа на оси положительного столба разряда аргона и росту температуры газа на стенке трубки вследствие возникновения вихревого движения в поле звуковой волны. При этом уменьшается радиальный перепад температур по радиусу положительного столба. Эффекты охлаждения газа и уменьшения радиального градиента температуры газа в разряде звуком проявляются сильнее с ростом интенсивности звука и разрядного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M.A. Antinyan, G.A. Galechyan, L.B. Tavakalyan.** Acta Acustica, **82**, 619 (1996).
2. **G.A. Galechyan.** Physics–Uspekhi, **38**, 1309 (1995).
3. **Y.G. Rapoport, O.K. Cheremnykh, V.V. Koshovy, M.O. Melnik. E.N. Tkachenko.** Annales Geophysicae, **35**, 53 (2017).
4. **Yu.A. Kopytenko, V.S. Ismaguilov, K. Hattori, M. Hayakawa.** Geophys. Res. Abstracts, **5**, 06751, EGS, Nicca, 2003.
5. **A.H. Mkrtchyan, L.Sh. Grigoryan, H.F. Khachatryan, S.G. Bilen, M. Parrot, A.V. Sargsyan, A.R. Aramyan.** IEEE Transactions on Plasma Science, **47**, 118 (2019).
6. **U. Ingard.** Phys. Rev., **145**, 41 (1966).
7. **Ya.B. Zel’dovich, Yu.P. Raizer.** Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena, Dover Publications Inc., 2003.
8. **L.D. Landau, E.M. Lifshitz.** Fluid Mechanics, Oxford, Pergamon Press, 1987.
9. **A.R. Aramyan, R.A. Aramyan, G.B. Hovhannesyan.** IEEE Transactions on Plasma Science, **47**, 5222 (2019).

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԼԻՔԻ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԴՐԱԿԱՆ ՍՅԱՆ
ԳԱԶԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏԻ ՎՐԱ

Ա.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Հ.Ֆ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Շ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ,
Գ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Լ.Ե. ԽԱՉԻԿՅԱՆ, Ա.Ր. ԱՐԱՄՅԱՆ

Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ ձայնային ալիքի դաշտում մրրկաձև շարժման պատճառով պարպման խողովակում կանգուն ձայնային ալիքի ինտենսիվության բարձրացումը հանգեցնում է գազի ջերմաստիճանի նվազմանը, արգոնային պարպման դրական սյան առանցքի վրա իսկ խողովակի պատի վրա գազի ջերմաստիճանի բարձրացմանը: Այս դեպքում դրական սյան շառավղով ջերմաստիճանի գրադիենտը նվազում է:

EFFECT OF SOUND WAVE ON THE GAS RADIAL TEMPERATURE GRADIENT OF POSITIVE COLUMN

A.H. MKRTCHYAN, H.F. KHACHATRYAN, L.SH. GRIGORYAN,
G.A. HARUTYUNYAN, L.E. KHACHIKYAN, A.R. ARAMYAN

It has been experimentally shown that an increase in the intensity of a standing sound wave in the discharge tube leads to a decrease in the gas temperature on the axis of the positive column of the argon discharge and an increase in the gas temperature on the tube wall due to the occurrence of vortex motion in the field of the sound wave. In this case, the radial temperature gradient decreases along the radius of the positive column.