

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Моделирование влияния ударной волны на температуру электронов плазмы положительного столба разряда в аргонеА. К. Сухов^a*Костромской государственной университет.
Россия, 156005, Кострома, ул. Дзержинского, 17.*

Поступила в редакцию 21.09.2020, после доработки 25.11.2020, принята к публикации 07.12.2020.

Проведено компьютерное моделирование влияния ударной волны на температуру электронов плазмы положительного столба разряда в аргоне. Использована одномерная гидродинамическая модель плазмы газового разряда, дополненная формулой связи относительной электронной температуры с приведенной напряженностью электрического поля. Получено распределение температуры электронов в ударной волне, оценено влияние ее интенсивности. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ударная волна, плазма, газовый разряд, компьютерное моделирование, двухжидкостная гидродинамика, температура электронов.

УДК: 533.951, 533.6.011.72. PACS: 52.35.Tc, 52.65.Kj, 52.80.Nc.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] было проведено моделирование распространения ударной волны (УВ) в плазме положительного столба тлеющего разряда в аргоне. Обнаружено разделение зарядов во фронте ударной волны с возникновением локального электрического поля, направленного вдоль распространения ударной волны. После фронта ударной волны напряженность электрического поля разряда вне зависимости от направления движения ударной волны уменьшалась. Это позволило предположить, что за фронтом ударной волны также происходило уменьшение электронной температуры. Такое охлаждение электронов было экспериментально зарегистрировано в работе [2].

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для детального изучения процесса охлаждения электронов за фронтом ударной волны необходим расчет локальной температуры электронов в области разряда с учетом характерного времени их нагрева и охлаждения. В расчетную модель, которая использовалась в работе [1], было добавлено эмпирическое соотношение связи, предложенное в работе [3], относительной электронной температуры T_e/T_0 с приведенной напряженностью электрического поля $|E|/p$, базирующееся на экспериментальных данных Таунсенда и Бейли [4]:

$$\frac{T_e}{T_0} = 29.96 \cdot \ln \left(\frac{|E|}{p} \right) + 24.64,$$

в котором приведенная напряженность электрического поля $|E|/p$ измеряется в В/(см·торр). Для проверки применимости данного соотношения к условиям моделирования газового разряда, используемым в данной работе, был проведен расчет установившейся температуры электронов в положительном столбе разряда. Данный расчет показал, что установившееся значение электронной температуры в расчете

составило $T_e = 2$ эВ. Это значение близко к экспериментально измеренному значению $T_e = 3$ эВ для этих же условий в работе [2], что показало удовлетворительное соответствие результатов.

Известно, что температуропроводность электронов существенно выше температуропроводности ионов и охлаждение электронов после фронта ударной волны за счет температуропроводности может приводить к охлаждению электронов перед фронтом ударной волны на характерном расстоянии порядка длины релаксации электронной температуры. Оценки коэффициентов температуропроводности электронов и ионов по формулам [5] $\chi_e = v_e^2 \cdot \tau_{ee}/3$ и $v_i^2 \cdot \tau_{ii}/3$ для условий расчета составили $\chi_e = 8.1 \cdot 10^{11}$ см²/с и $\chi_i = 3.6 \cdot 10^5$ см²/с соответственно. Поэтому при расчете учитывалось сглаживание градиентов температуры электронов за счет их высокой температуропроводности путем введения пространственного масштаба усреднения электронной температуры, составляющее, по оценкам работы [6], в условиях моделирования величину порядка $\lambda_{Te} \approx 0.3$ см. Моделирование прохождения ударной волны в программе проводилось аналогично [1]. Движение УВ в положительном столбе разряда задавалось как в направлении от анода к катоду, так и в обратном направлении.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметры расчетов выбирались, как в работе [1]: давление аргона $p = 7.3$ торр, прикладываемое напряжение $U = 2000$ В, балластное сопротивление $R_b = 70$ кОм, длина разряда $l = 10$ см, радиус трубки $r = 1.8$ см. Использование эмпирического соотношения связи относительной электронной температуры от приведенной напряженности электрического поля позволило рассчитать установившееся значение температуры электронов в положительном столбе равное $T_e = 2$ эВ, которое оказалось несколько меньше принятого в работе [1]. Рассчитанный ток разряда не отличался от предыдущего расчета [1] и составил $I_d = 20$ мА, так же, как и плотность зарядов в положительном столбе: $n_e = 6.7 \cdot 10^9$ см⁻³.

^a E-mail: suhov_andrei@mail.ru

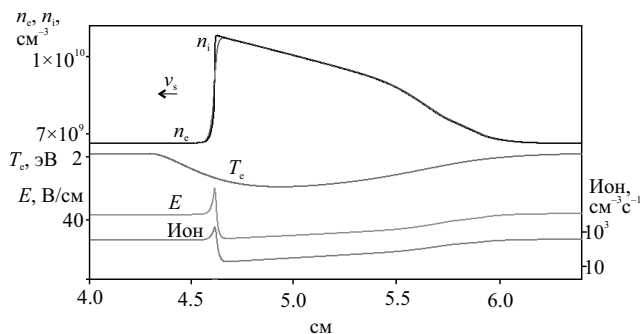


Рис. 1. Распределение параметров плазмы вблизи фронта ударной волны движущейся от анода к катоду (обозначения в тексте)

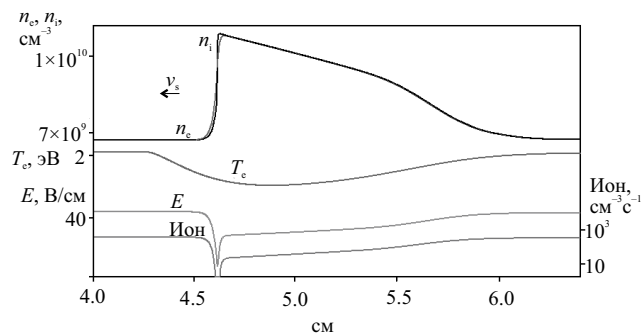


Рис. 2. Распределение параметров плазмы вблизи фронта ударной волны движущейся от катода к аноду (обозначения аналогичны рис. 1)

Полученные рассчитанные параметры были близки к экспериментально измеренным в работе [2].

Движение ударной волны по положительному столбу разряда задавалось как в работе [1], в виде скачка сжатия плотности ионов треугольной формы и шириной фронта $l_s \approx 20\lambda$, где λ — длина свободного пробега нейтральных частиц (для аргона при $p = 7.3$ торр, $\lambda = 7 \cdot 10^{-4}$ см).

Полученное стационарное распределение параметров плазмы в УВ, движущейся от анода к катоду в положительном столбе разряда со скоростью $v_s = 450$ м/с (число Маха $M = 1.41$), представлено на рис. 1.

Так же, как в предыдущем расчете [1], во фронте УВ наблюдалось разделение зарядов, но, кроме того, фиксировался вынос не только ионной n_i , но и электронной n_e компоненты плазмы перед фронтом на расстояние порядка дебаевского радиуса ($r_D \approx 10^{-2}$ см). Величина скачка локального электрического поля E во фронте ударной волны при учете изменения электронной температуры T_e уменьшилась с 35 до 17 В/см. Также уменьшилось падение электрического поля за фронтом ударной волны с 17 до 15 В/см. Скорость ионизации Ион повторяла поведение напряженности электрического поля E .

Качественным изменением результатов расчетов стало поведение заряженной компоненты плазмы за фронтом ударной волны. После фронта УВ в ходе расчета проявился характерный излом спада плотности зарядов, который наблюдался и в экспериментальных измерениях в работе [2]. Расчет показал, что уменьшение электронной температуры за счет высокой электронной температуропроводности происходило и перед фронтом ударной волны на расстоянии, соответствующем пространственному масштабу электронной температуропроводности. Оценка длины релаксации электронной температуры за счет упругих электрон-нейтральных соударений $\Lambda_u = v_d \tau_u = 0.8l/\sqrt{\delta}$ [5] для условий моделирования дала значение $\Lambda_u = 1.5$ см, которое по порядку величины соответствует пространственному масштабу выноса охлаждения электронов перед фронтом ударной волны.

В результате расчет подтвердил теплопроводный механизм образования предвестника охлаждения электронов, который был экспериментально зарегистрирован в работе [2], что говорит о соответ-

ствии результатов моделирования экспериментальным данным. В количественном отношении также наблюдалось согласие результатов по охлаждению электронов, которое и в расчете и в эксперименте составило около 1.5 раз.

Таким образом, ударная волна, распространяющаяся в положительном столбе разряда, существенно влияет на заряженную компоненту и ионизационные процессы в плазме. Она не только приводит к возникновению разделения зарядов и изменению локального электрического поля на фронте ударной волны, уменьшению электронной температуры после фронта УВ, но и воздействует на вынос охлажденных за фронтом электронов вперед перед фронтом с возникновением теплопроводного предвестника. Эти результаты подтверждаются экспериментальными измерениями [2]. Охлаждение электронов в окрестности фронта УВ существенно влияет на процессы ионизации и возбуждения. Например, в работе [2], экспериментально регистрировалось уменьшение интенсивности свечения плазмы как перед фронтом УВ, так и за ним.

На рис. 2 показано распределение параметров плазмы в УВ при ее движении от катода к аноду.

При распространении УВ от катода к аноду локальное электрическое поле в ее фронте, обусловленное разделением зарядов, направлено противоположно продольному электрическому полю разряда. Однако это не влияло на величину уменьшения напряженности электрического поля после фронта УВ. Результаты моделирования показали, что и в этом случае охлаждение электронов после фронта УВ было таким же, как и при распространении УВ от анода к катоду.

Результаты моделирования позволили сделать вывод о незначительности влияния направления распространения УВ на распределение параметров плазмы в окрестности ее фронта. Проведенное моделирование для скорости ударной волны $v_s = 600$ м/с (число Маха = 1.88) показало, что увеличение скорости УВ приводило в результатах моделирования к возрастанию скачков плотности электронов и напряженности электрического поля и более сильному охлаждению электронов. В таблице приведены результаты расчетов скачков параметров плазмы на фронте УВ для разных значений скорости и направления УВ. Обозначения параметров: n_n/n_{n0} и n_e/n_{e0} — скачки плотности нейтральных атомов

Таблица. Скачки параметров плазмы на фронте УВ

v_s , м/с	Направление	n_n/n_{n0}	n_e/n_{e0}	T_e/T_{e0}	ΔE_1 , В/см	ΔE_2 , В/см
450	Анод—катод	1.60	1.58	0.70	17.7	14.6
450	Катод—анод	1.60	1.58	0.70	34.8	14.9
600	Анод—катод	2.16	2.14	0.48	32.4	20.7
600	Катод—анод	2.16	2.15	0.47	57.5	23.0

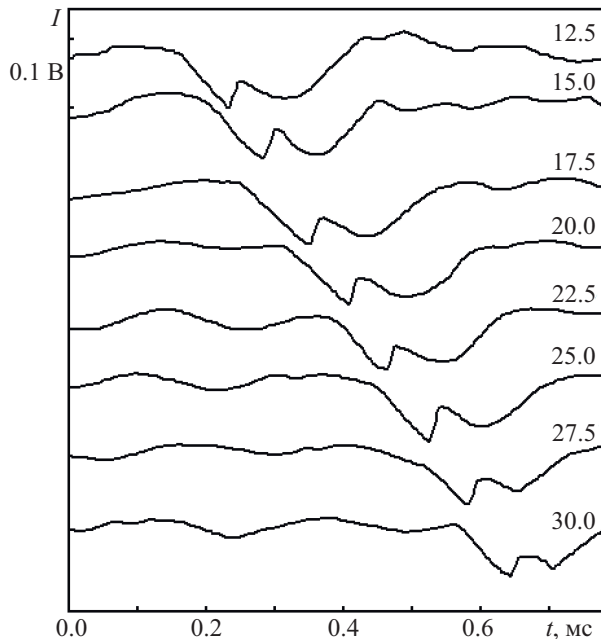


Рис. 3. Поведение свечения плазмы вблизи фронта ударной волны движущейся от катода к аноду в аргоне при давлении $p = 6$ торр, токе разряда $I_d = 20$ мА, числе Маха УВ $M = 1.3$. Числа обозначают расстояние от начала плазмы в сантиметрах

и электронов на фронте УВ, T_e/T_{e0} — относительное уменьшение температуры электронов, ΔE_1 — скачок напряженности электрического поля на фронте, ΔE_2 — падение напряженности электрического поля за фронтом относительно невозмущенной плазмы.

Сравнивая полученные результаты с результатами работы [1], можно сделать вывод, что учет изменения электронной температуры в модели привел к уменьшению рассчитанного скачка электрического поля во фронте УВ примерно в 1.5 раза. Уменьшение напряженности поля за фронтом УВ изменилось незначительно и влияние учета изменения электронной температуры в модели на электрическое поле за фронтом УВ в пределах ошибки не наблюдалось.

Наблюдаемое в экспериментальных измерениях работы [2] уменьшение интенсивности свечения плазмы перед и за фронтом УВ (рис. 3), согласно полученным расчетам, по-видимому, обусловлено локальным охлаждением электронов и уменьшением электрического поля вблизи УВ на масштабах электронной температуропроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была модифицирована модель прохождения ударной волны в положительном столбе разряда в аргоне путем дополнения ее зависимостью электронной температуры от приведенного электрического поля и усреднением электронной

температуры на масштабе электронной температуропроводности. Такая усовершенствованная модель позволила рассчитать установившееся значение температуры электронов в положительном столбе разряда в аргоне для заданных исходных параметров: давления аргона для $p = 7.3$ торр, прикладываемого напряжения $U = 2000$ В, балластного сопротивления $R_b = 70$ кОм, длины разряда $l = 10$ см, радиуса трубки $r = 1.8$ см. Полученное значение $T_e = 2$ эВ близко к измеренному экспериментально в работе [2].

В ходе моделирования получены установившиеся распределения температуры электронов в УВ, распространяющейся в плазме положительного столба разряда в аргоне. Обнаружено охлаждение электронов как за, так и перед фронтом УВ, величина которого растет с увеличением ее скорости. Механизм такого охлаждения связан со спадом напряженности приведенного электрического поля за фронтом УВ и, как следствие, уменьшением нагрева электронов полем. За счет высокой температуропроводности электронов их охлаждение выносится и перед фронтом УВ на расстояние масштаба температуропроводности электронов. Это подтверждает теплопроводный механизм возникновения «предвестника», но процесс формирования «предвестника» требует дальнейших исследований.

Величина уменьшения температуры электронов за фронтом УВ количественно согласуется с экспериментально измеренным значением в работе [2], что подтверждает адекватность модели.

Однако моделируемый профиль температуры электронов не отображал полностью размер наблюдавшегося экспериментально выноса области пониженной температуры электронов перед фронтом УВ, что будет предметом дальнейшего совершенствования модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухов А. К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2017. № 5. С. 39. (Sukhov A. K. // Moscow Univ. Phys. Bull. 72, N 5. P. 480.)
2. Сухов А. К. Изменение структуры и параметров плазмы и ударной волны при их взаимодействии в инертных газах: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / МГУ им. М. В. Ломоносова. Москва, 1988.
3. Петрусев А. С., Суржиков С. Т., Шенг Дж. С. // Теплофизика высоких температур. 2006. 44, № 6. С. 814. (Petruşev A. S., Surzhikov S. T., Shang J. S. // High Temperature. 2006. 44, N 6. P. 804.)
4. Bailey V. A., Townsend J. S. // Philosophical Magazine. 1921 S. 6, 42, P 873.
5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2009.
6. Семиохин И. А. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме: Учеб. пособ. М.: Изд. Моск. ун-та, 1988.

Simulation of the Shock Wave Effect on the Plasma Electron Temperature of a Positive Discharge Column in Argon

A. K. Sukhov

Kostroma State University. Kostroma 156005, Russia.

E-mail: suhov_andrei@mail.ru.

The effect of a shock wave on the temperature of plasma electrons of the positive discharge column in argon is simulated. A one-dimensional hydrodynamic model of a gas discharge plasma along with a formula for the relationship between the relative electron temperature and the reduced electric field strength has been used. The distribution of the electron temperature in the shock wave has been obtained and the effect of the shock wave intensity has been estimated. The simulation results were compared with the experimental data.

Keywords: shock wave, plasma, gas discharge, computer simulation, two-fluid hydrodynamics, electron temperature.

PACS: 52.35.Tc, 52.65.Kj, 52.80.Hc.

Received 21 September 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 1. Pp. 47–50.*

Сведения об авторе

Сухов Андрей Константинович — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: suhov_andrei@mail.ru.