ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Моделирование прохождения ударной волны в плазме положительного столба разряда в аргоне

А.К. Сухов

Костромской государственный университет. Россия, 156005, Кострома, ул. Дзержинского, д. 17. E-mail: suhov_andrei@mail.ru

Статья поступила 27.10.2016, подписана в печать 18.01.2017.

Проведено компьютерное моделирование распространения ударной волны в плазме положительного столба разряда в аргоне. Использована одномерная модель плазмы газового разряда, включающая уравнения непрерывности для электронной и ионной компонент плазмы и уравнение электростатики с учетом начальных и граничных условий. Получено распределение параметров плазмы в ударной волны, оценено влияние ее интенсивности. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ударная волна, плазма, газовый разряд, компьютерное моделирование, двухжид-костная гидродинамика.

УДК: 533.951, 533.6.011.72. РАСS: 52.35.Тс, 52.65.Кј, 52.80.Нс.

Введение

Интерес к вопросам взаимодействия ударных волн (УВ) со слабоионизованной неизотермической плазмой поддерживается уже длительное время. Это связано с интенсивной разработкой и внедрением в практику мощных импульсных газоразрядных лазеров, МГД-генераторов и плазменных двигателей. Например, гидродинамические скачки, возникающие в активной среде лазеров во время разряда, могут влиять на параметры излучаемого импульса. Кроме того, взаимодействие отсоединенных ударных волн с ионизованным газом может резко снижать лобовое сопротивление сверхзвуковых летательных аппаратов и т. д.

Несмотря на длительность исследований, например [1, 2], физическая картина явлений, возникающих при распространении ударных волн в термически неравновесной слабоионизованной плазме, изучена недостаточно. Сложность исследований взаимодействия гидродинамических разрывов с плазмой заключается в необходимости учета целого ряда процессов, действующих одновременно: упругих и неупругих столкновений, диффузии, теплопроводности, нагрева и изменения плотности газа.

В случае распространения ударных волн в слабоионизованной плазме имеют место как прямое воздействие ударной волны на плазму, так и обратное влияние плазмы на ударную волну. В обратной задаче основным является вопрос об изменении структуры и параметров ударной волны при ее движении в плазме и механизме этого изменения. Ввиду малости энергии поступательного движения ударной волны наиболее отчетливо влияние плазмы на нее будет в интересном для практики случае, когда число Маха ударной волны не сильно превышает единицу. В работах [3–5] показано, что основной вклад в изменение структуры ударной волны при ее движении в слабоионизованной плазме дает омический нагрев нейтральной компоненты, который приводит к ускорению ударной волны и искривлению ее фронта.

Прямая задача связана с изучением влияния ударной волны на заряженную компоненту плазмы. Научный интерес представляют воздействие ударной волны на такие параметры плазмы, как концентрация заряженных частиц, электрическое поле, температура электронов и тяжелых частиц, излучательные характеристики и т. д. Отдельным является вопрос устойчивости плазмы при вхождении и распространении в ней ударных волн. В работах [6-9] экспериментально исследовано влияние ударной волны на заряженную компоненту плазмы. Обнаружены увеличение свечения плазмы, скачки плотности зарядов и потенциала плазмы, возникновение выноса возмущения плазмы перед фронтом ударной волны (так называемый «предвестник») и локальное понижение электронной температуры в области фронта.

Целью настоящей работы являлось одномерное моделирование прохождения ударной волны в плазме положительного столба разряда в аргоне. Одномерная модель учитывает не все особенности реального взаимодействия ударной волны с плазмой разряда, но позволяет выяснить основные механизмы этого взаимодействия, что составляло задачу настоящего исследования. Выбор газа обусловлен его стабильностью и использованием в экспериментах, с которыми сравниваются результаты моделирования.

1. Описание модели

Разрядный процесс описывался одномерной системой дифференциальных уравнений двухжидкостной гидродинамики [10, 11] включавшей уравнения непрерывности для электронов и ионов и уравнение Пуассона

$$\begin{cases} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} = \alpha |\Gamma_e| - \beta n_e n_i, \quad \Gamma_e = -n_e \mu_e E, \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_i}{\partial x} = \alpha |\Gamma_e| - \beta n_e n_i, \quad \Gamma_i = n_i \mu_i E, \\ \frac{\partial E}{\partial x} = 4\pi e(n_i - n_e), \qquad E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \end{cases}$$

где n_e , n_i — концентрации, Γ_e , Γ_i — потоки, μ_e , μ_i — подвижности соответственно электронов и ионов, α — первый ионизационный коэффициент Таунсенда, β — коэффициент объемной рекомбинации, e — элементарный заряд, E — напряженность электрического поля, ϕ — потенциал плазмы.

Эти уравнения применимы, если времена между столкновениями электронов с электронами и ионов с ионами малы по сравнению со всеми остальными характерными временами.

Систему уравнений решали методом конечных разностей [12]. Для решения уравнения Пуассона использовали метод прогонки.

Для моделирования прохождения ударной волны в программе формировали профиль ионной компоненты плазмы, соответствующий профилю нейтральной компоненты в реальных ударных волнах взрывного типа. Такой подход обусловлен тем, что сжатие нейтральной компоненты во фронте УВ приводит к сжатию ионной компоненты плазмы за счет ион-нейтрального трения [13]. Моделируемая форма УВ представлена на рис. 1 и соответствует ударным волнам взрывного типа.



Рис. 1. Форма моделируемой УВ, vs — скорость

До фронта ударной волны плотность ионов была равна исходной, характерной для невозмущенной плотности зарядов в положительном столбе разряда. На фронте ударной волны плотность ионов росла по кривой Гаусса до значения, равного скачку плотности нейтральных атомов. После максимума плотность линейно спадала до невозмущенной плотности зарядов. Такое распределение плотности ионов задавалось в расчете перед методом прогонки с периодичностью, соответствующей среднему времени между столкновениями нейтральных атомов. Движение УВ в положительном столбе разряда моделировалось как в направлении от анода к катоду, так и в обратном направлении.

2. Результаты моделирования

Для моделирования прохождения фронта ударной волны в установившейся плазме положительного столба разряда в аргоне сначала задавался расчет [11], в ходе которого рассчитывалось развитие тлеющего разряда в течение 20 мкс при следующих параметрах: 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. За это время параметры разряда выходили на стационарный уровень: ток разряда $I_d = 20$ мА, плотность зарядов в положительном столбе $n_e = 6.8 \cdot 10^9$ см⁻³, температура электронов $T_e = 3$ эВ.

Затем моделировалось движение ударной волны по положительному столбу разряда в виде скачка плотности ионов треугольной формы, со скоростью $v_s = 450$ м/с (число Маха M = 1.41) 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). В ходе расчета устанавливалось стационарное распределение параметров плазмы во фронте УВ, представленное на рис. 2.



Рис. 2. Распределение параметров плазмы вблизи фронта ударной волны движущейся от анода к катоду (обозначения в тексте)

Плотность ионов n_i во фронте УВ повторяла скачок плотности нейтральных атомов, так как сжатие нейтральной компоненты во фронте приводило к сжатию заряженной за счет ион-нейтрального трения [13]. При этом наблюдалось разделение зарядов на фронте — профиль плотности электронов n_e был шире профиля плотности ионов n_i . Разделение имело вид выноса отрицательного заряда перед фронтом и избыток положительного за фронтом. Такое разделение зарядов имеет диффузионную природу и объясняется большей подвижностью электронов по сравнению с ионами. Размер выноса определяется дебаевским радиусом и соответствует расчетным значениям (для условий моделирования дебаевский радиус составлял $r_D \approx 10^{-2}$ см).

Разделение зарядов обусловливало появление скачка локального электрического поля *E* во фронте ударной волны. После фронта напряженность электрического поля в плазме падала. Скачок плотности заряженной компоненты во фронте УВ локально повышал плотность зарядов в положительном столбе. Это приводило к уменьшению требуемого значения локального электрического поля для поддержания баланса заряженных частиц [14] и являлось причиной уменьшения напряженности электрического поля после фронта УВ.

Такое поведение локального поля обусловливало изменение скорости ионизационных процессов *q*_{ion} и локальной электронной температуры. Во фронте ударной волны скорость ионизации несколько возрастала вследствие увеличения локального электрического поля. За фронтом ионизация падала вслед за полем.

Хотя скачок напряженности электрического поля на фронте превышал его падение за фронтом, влияние падения сильнее, так как его локализация существенно больше. Размер области пониженного поля за фронтом много больше области скачка во фронте. Это означает, что область плазмы с меньшей напряженностью поля, имея значительный размер, будет сильно влиять на распределение параметров заряженной компоненты и это изменение можно зарегистрировать в эксперименте как область более слабого свечения и пониженной электронной температуры.

Таким образом, ударная волна, распространяющаяся в положительном столбе разряда, существенно влияет на ионизационные процессы в плазме. Она приводит к возникновению разделения зарядов и локального электрического поля на фронте ударной волны, уменьшению напряженности электрического поля и скорости ионизации после фронта УВ.

2.1. Влияние направления движения ударной волны

Локальное электрическое поле во фронте УВ, обусловленное разделением зарядов, направлено в сторону ее распространения. Оно взаимодействует с продольным электрическим полем разряда. Поэтому важную роль в поведении заряженной компоненты во фронте УВ играет направления ее движения. На рис. 3 показано распределение параметров плазмы во фронте УВ при ее движении от катода к аноду.

Видно, что если в первом случае (рис. 2) локальное поле усиливало поле разряда и ионизация во фронте возрастала, то во втором (рис. 3) локальное поле уменьшало поле разряда, практически останавливая ионизацию. После фронта УВ результирующее электрическое поле по величине меньше невозму-



Рис. 3. Распределение параметров плазмы вблизи фронта ударной волны, движущейся от катода к аноду (обозначения аналогичны рис. 2)

щенного поля разряда, как и в первом случае. Таким образом, направление движения УВ влияло лишь на локальное поле на фронте, не изменяя характер поведения поля за фронтом. В обоих случаях за фронтом УВ наблюдалось уменьшение величины напряженности поля разряда и соответствующее уменьшение ионизационных процессов.

2.2. Влияние скорости ударной волны

Интенсивность ударной волны является главной ее характеристикой. Она определяет ее скорость, скачок плотности на фронте, разрушающую способность и другие параметры. Было рассмотрено влияние скорости ударной волны на поведение заряженной компоненты плазмы разряда в аргоне. Для этого проведено сравнение моделирования прохождения ударной волны, с разной скоростью — 450 и 600 м/с (число Маха 1.41 и 1.88) — в плазме аргона.

Увеличение скорости ударной волны обусловливало возрастание скачка плотности нейтрального газа на ее фронте. За счет ион-нейтрального трения это приводило к возрастанию скачка плотности ионов плазмы. Увеличенный скачок плотности ионов за счет электростатического взаимодействия приводил к возрастанию скачков плотности электронов и напряженности электрического поля, что и наблюдалось в результатах моделирования (таблица). В таблице n_n/n_{n0} и n_e/n_{e0} — скачки плотности нейтральных атомов и электронов на фронте УВ, ΔE_1 — изменение напряженности электрического голя на фронте, ΔE_2 — падение напряженности электрического ноля на фронте, ΔE_2 — падение напряженности электрического ноля на фронте и за фронтом относительно невозмущенной плазмы.

Данные таблицы показывают, что увеличение скорости УВ существенно влияло на скачки пара-

	<i>vs</i> , м/с	Направление	n_n/n_{n0}	n_e/n_{e0}	ΔE_1 , В/см	ΔE_2 , В/см
	450	Анод-катод	1.59	1.57	35.3	16.8
	450	Катод-анод	1.59	1.57	52.2	13.6
	600	Анод-катод	2.16	2.12	63.6	24.4
	600	Катод-анод	2.16	2.12	90.0	21.0

Скачки параметров плазмы на фронте УВ

метров заряженной компоненты плазмы на фронте УВ. Возрастание скорости УВ v_s от 450 до 600 м/с повышало скачок напряженности поля на фронте ΔE_1 примерно в 1.7 раза и падение поля за фронтом ΔE_2 примерно в 1.5 раза, в то время как скачки по нейтральной и заряженной компонентам возрастали примерно в 1.3 раза.

Таким образом, возрастание интенсивности ударной волны существенно влияло на заряженную компоненту плазмы, локальное электрическое поле и скорости ионизационных и рекомбинационных процессов в окрестности фронта ударной волны.

3. Сравнение моделирования с экспериментальными результатами

Результаты моделирования сравнивали с экспериментальными данными прохождения ударной волны в положительном столбе разряда в аргоне, приведенные в работе [7]. В настоящей работе интенсивность свечения плазмы измерялась с помощью ФЭУ, а концентрация и температура электронов рассчитывалась из сдвига фазы и затухания СВЧ-волны в плазме.

За фронтом ударной волны, распространяющейся в плазме положительного столба разряда в аргоне, в эксперименте наблюдались пониженная интенсивность свечения плазмы и локальное охлаждение электронов, сопровождающееся спадом их концентрации (рис. 4). Окончание спада соответствовало границе области охлаждения. Охлаждение электронов за счет их высокой теплопроводности выносилось и перед фронтом УВ в виде теплопроводностного предвестника. Этот вынос также регистрировался в понижении интенсивности излучения плазмы перед фронтом УВ. Размеры области пониженного свечения плазмы за фронтом ударной волны были в 2–3 раза больше размеров предвестника.



Рис. 4. Поведение интенсивности свечения плазмы I, концентрации N_e и относительной температуры T_e/T_{e0} электронов в окрестности фронта ударной волны в плазме [7]. Аргон, p = 7.3 торр, $I_d = 20$ мА, M = 1.4. Фронт ударной волны по нейтральной компоненте показан стрелкой

Температура электронов в разряде определяется напряженностью электрического поля [15]. Таким образом, локальное понижение электронной температуры свидетельствовало о локальном уменьшении напряженности электрического поля. Это позволило качественно связать наблюдаемое в эксперименте понижение электронной температуры в окрестности фронта УВ с результатом моделирования, в котором наблюдалось уменьшение напряженности электрического поля после УВ. Кроме того, моделирование показало наличие локальных скачков напряженности электрического поля во фронте УВ, которые в эксперименте не регистрировались из-за невысокого пространственного разрешения приборов. Тем не менее, проявились и недостатки модели. В моделировании не отображался вынос пониженной напряженности электрического поля перед фронтом ударной волны, что стимулирует совершенствование модели для более полного отражения физических явлений.

Заключение

В настоящей работе была реализована модель прохождения ударной волны в положительном столбе разряда в аргоне. Во фронте ударной волны плотность ионов повторяла скачок плотности нейтральных атомов, при этом наблюдалось разделение зарядов, которое обусловливало появление локального электрического поля. За фронтом ударной волны напряженность поля была существенно меньше, чем в невозмущенной плазме. Такое уменьшение локального поля обусловливало понижение скорости ионизационных процессов и локальной электронной температуры.

Увеличение скорости ударной волны приводило к возрастанию скачка плотности зарядов на фронте ударной волны и локального скачка электрического поля. Спад напряженности электрического поля после фронта ударной волны при возрастании ее скорости также увеличивался. Это приводило к сильному уменьшению скорости ионизации зарядов за фронтом.

Проведено сравнение поведения заряженной компоненты плазмы и напряженности поля вблизи фронта ударной волны с экспериментальными данными, что показало наличие качественного соответствия результатов. Понижение электронной температуры за фронтом ударной волны в эксперименте связано со спадом напряженности электрического поля, наблюдаемом в моделировании.

Список литературы

- 1. Климов А.И., Коблов А.Н., Мишин Г.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. **8**, № 7. С. 439.
- 2. Барышников А.С., Басаргин И.В., Бобашев С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. **41**, № 15. С. 83. (Baryshnikov A.S. Basargin I.V., Bobashev S.V. et al. // Tech. Phys. Lett. **41**, N 8. P. 753.)
- 3. *Кузовников А.А., Свиридкина Р.С., Сухов А.К.* и др. // Деп. ВИНИТИ № 899-В88 от 02.02.1988 г.

- 4. *Кузовников А.А., Свиридкина В.С., Сухов А.К.* и др. // Деп. ВИНИТИ № 2220-В88 от 21.03.1988 г.
- 5. Войнович П.А., Ершов А.П., Пономарева С.Е., Шибков В.М. // ТВТ. 1991. **29**, № 3. С. 582. (Vojnovich P.A., Ershov A.P., Ponomareva S.E., Shibkov V.M. // High Temperature. **29**, N 3. P. 582.)
- 6. Исаева Л.Д., Кузовников А.А., Мартишин С.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. № 3. С. 90.
- Сухов А.К. Изменение структуры и параметров плазмы и ударной волны при их взаимодействии в инертных газах: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1988.
- 8. Басаргин И.В., Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1989. 15, № 8. С. 55.
- Васильев О.Г., Ершов А.П., Пономарева С.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 2. С. 86.

- 10. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов. М., 2006.
- 11. *Сухов А.К.* // Вестн. КГУ им. Н. А. Некрасова. 2013. **19**, № 2. С. 15.
- 12. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М., 1978.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966.
- 14. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный, 2009.
- Петрусев А.С., Суржиков С.Т., Шенг Дж.С. // ТВТ.
 2006. 44, № 6. С. 814. (Petrusev A.S., Surzhikov S.T., Shang J.S. // High Temperature. 2006. 44, N 6. P. 804.)

Simulation of shock-wave propagation in the argon plasma of a positive column discharge

A.K. Sukhov

Kostroma State University. Kostroma 156005, Russia E-mail: suhov_andrei@mail.ru.

The computer simulation of shock-wave propagation in the argon plasma of positive column discharge was performed. A one-dimensional model of the gas-discharge plasma is used, which comprises the continuity equations for the electron and ion plasma components and the equation of electrostatics with allowance for initial and boundary conditions. The distribution of plasma parameters in the shock wave was obtained; the effect of its intensity was evaluated. The simulation results were compared with experimental data.

Keywords: shock wave, plasma, gas discharge, computer simulation, two-fluid hydrodynamics. PACS: 52.35.Tc, 52.65.Kj, 52.80.Hc. *Received 27 October 2016*.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2017. 72, No. 5. Pp. 480-484.

Сведения об авторе

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