

УДК 537.525

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ТЕМПЕРАТУРУ ГАЗА

© 2025 г. Р. Ф. Юнусов^{а, *}, З. Д. Закиров^а, Э. Р. Юнусова^б

^аКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, ул. Карла Маркса 10, Казань, 420111 Россия

^бГАУЗ ГKB № 7, ул. Маршала Чуйкова 54, Казань, 420103 Россия

*E-mail: optanir@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 26.07.2024 г.

Принята к публикации 01.08.2024 г.

В работе представлено экспериментальное исследование зависимости температуры газа в тлеющем разряде от газодинамических параметров потока и энергетических параметров разряда. Давление газа и его расход в разрядной камере изменялись в интервале значений: $P = (2.5–5.5)$ кПа; $G = (0–0.035)$ г/с. Сила тока разряда и вкладываемая в разряд мощность также изменялись в диапазонах: $I = (30–80)$ мА, $N = (30–80)$ Вт. Измерения температуры газа проводилось термопарным методом в шести точках разрядного промежутка, что позволило также оценить изменение температуры газа вдоль оси цилиндрического канала и по его радиусу. При малом расходе газа разряд осесимметричен и заполняет весь объем разрядного промежутка. С увеличением силы тока и мощности разряда температура газа растет приблизительно по линейному закону со средней скоростью 5 К/Вт. С увеличением расхода воздуха в диапазоне $G = (0.017–0.035)$ г/с происходит перестройка разряда из объемной в шнуровую форму, температурное поле разряда существенно изменяется: в центре разряда температура резко уменьшается и практически не изменяется с ростом мощности разряда, в то время как вблизи локализации разряда температура газа с ростом мощности линейно растет со средней скоростью 3 К/Вт.

Ключевые слова: тлеющий разряд, разрядная камера, температура газа, термопара, сила тока, мощность разряда, давление и расход газа

DOI: 10.56304/S2079562923030363

ВВЕДЕНИЕ

Тлеющий разряд играет важную роль в различных отраслях науки, техники. Он применяется для обработки разного рода поверхностей, для нанесения покрытий, а также для создания инверсионной среды в газовых лазерах, в энергосберегающих лампах, в плазмохимии, в тиратронах, в производстве наноматериалов. Некоторые свойства тлеющего разряда без потока газа и его применения описаны в работах [1–3]. В связи с развитием газовых лазеров, плазмохимии, новых способов получения наноматериалов стало актуальным исследование тлеющего разряда в проточных системах. Некоторые эксперименты также описаны в работах [4–13]. Целью данной работы является дальнейшее экспериментальное исследование зависимости температуры газа в тлеющем разряде от

газодинамических параметров потока и энергетических параметров разряда.

СХЕМА УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема разрядной камеры показана на рис. 1.

Основой разрядной камеры является кварцевая цилиндрическая трубка 3 с внутренним диаметром 0.01 м. В боковых отростках этой трубки располагаются медные электроды 1 и 2, расстояние между которыми составляет 0.06 м вдоль оси

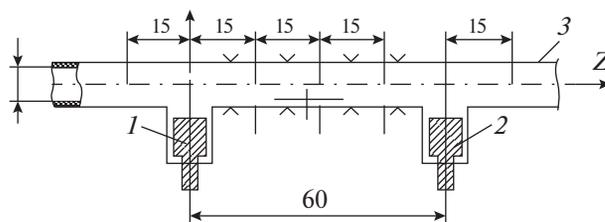


Рис. 1. Схема разрядной камеры для измерения температуры газа в плазме тлеющего разряда.

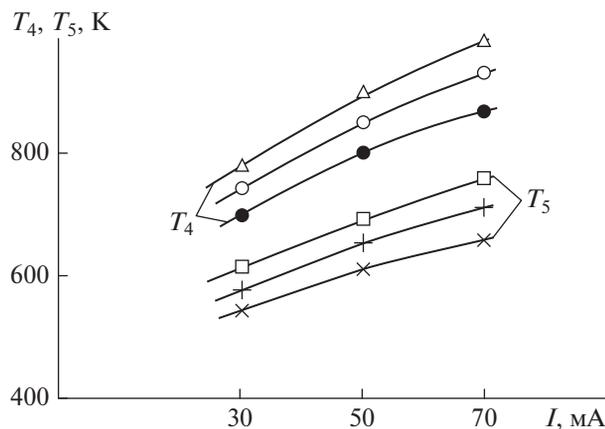


Рис. 2. Зависимости температуры газа от тока разряда при $R = 0.005$ м и $G = 0.007$ г/с. Обозначения: ●, × → $P = 2.5$ кПа; ○, + → $P = 3.9$ кПа; △, □ → $P = 5.5$ кПа.

камеры. На наружной поверхности разрядной камеры находятся девять направляющих капилляров для ввода термопар и измерения давления. Использовались остеклованные хромель-алюмелевые термопары диаметром 0.2 мм. При подаче высоковольтного напряжения между электродами 1 и 2, в указанной области разрядной трубки возникает тлеющий разряд, который в отсутствии потока газа полностью ее заполняет. В области разряда температура газа измерялась шестью термопарами: от T_2 до T_6 . Термопары T_2, T_4, T_6 вводились в капилляры по радиусу в центр разрядной камеры, а остальные три термопары (T_3, T_5, T_7) вводились с противоположной стороны трубки на расстояние 0.8 мм, то есть находились вблизи ее внутренней поверхности. Таким образом, термопары T_2 и T_3, T_4 и T_5, T_6 и T_7 , располагались в трех сечениях разрядной камеры, отстоящих друг от друга на 15 см. Такое расположение термопар позволяет определить распределение температуры газа по длине разрядной камеры, а также оценить радиальный перепад температур. Температура нейтральных частиц измерялась после установления стационарного режима, что определялось по стабильности значений входных и выходных параметров. Температура газа вне зоны разряда измерялась термопарами T_1 и T_8 . Значения температуры газа в плазме тлеющего разряда были получены при различных параметрах потока. Давление газа P и его расход G изменялись в интервале значений: $P = (2.5-5.5)$ кПа; $G = (0-0.035)$ г/с. Сила тока разряда I , и вкладываемая в разряд мощность N изменялись соответственно в диапазонах: $I = (30-80)$ мА, $N = (30-80)$ Вт.

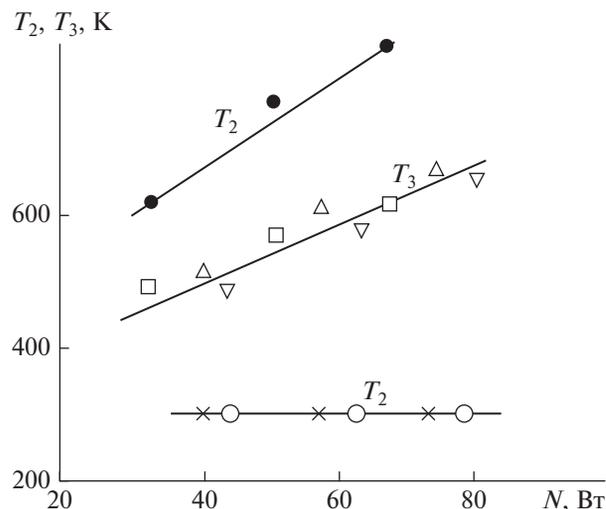


Рис. 3. Зависимости T_2 и T_3 от мощности разряда при $R = 0.005$ м и $P = 2.5$ кПа. Обозначения: ●, □ — $G = 0.007$ г/с, △, × — $G = 0.017$ г/с, ▽, ○ — $G = 0.035$ г/с.

Расход газа измерялся ротаметрами типа РС-3 и РС-3А и образцовыми манометрами типа МО. Давление газа в разрядной камере измерялось U-образным ртутным манометром, а давление в рабочем помещении — барометром-анероидом БА типа БВ.

На рис. 2 приведены зависимости температуры нейтральных частиц от тока разряда, где T_4 — температура на оси разрядной камеры, а T_5 — температура на расстоянии 1 мм от стенки разрядной камеры. Аналогичные результаты могут быть получены и для температур на оси разрядной камеры T_2, T_6 , а также температур на расстоянии 1 мм от стенки разрядной камеры T_3 и T_7 .

С увеличением силы тока температура газа на оси разряда повышается примерно по линейному закону со скоростью от 2.5 К/мА при давлении $P = 2.5$ кПа до 5 К/мА при давлении $P = 5.5$ кПа. Радиальный перепад температур увеличивается с ростом давления от 200 К при давлении $P = 2.5$ кПа до 240 К при давлении $P = 5.5$ кПа. При изменении давления газа в диапазоне $P = (2.5-5.5)$ кПа и силе тока $I = 30$ мА, его температура газа в центре разрядной камеры увеличивается примерно на 100 К, а вблизи ее поверхности примерно на 50 К. Это увеличение достигает соответственно значений 150 К в центре разрядной камеры и 100 К вблизи ее внутренней поверхности при силе тока $I = 70$ мА.

Зависимость температуры газа вкладываемой в разряд мощности, а также влияние расхода воздуха показано на рис. 3.

С учетом положения термопар, сравнения рис. 2 и 3 можно прийти к выводу, что температу-

ра газа при малых расходах вдоль оси разрядной камеры в центре увеличивается на примерно на 100 К, а вблизи внутренней поверхности — на 50 К, то есть средняя скорость возрастания температуры газа вдоль оси разрядной камере в центре составляет примерно 7 К/см, а вблизи внутренней поверхности — 3.5 К/см. Зависимость температуры газа от вкладываемой в разряд мощности при расходе газа воздуха $G = 0.007$ г/с примерно линейная. Средняя скорость повышения температуры газа по сечению разрядной камеры составляет 5 К/Вт.

Если увеличить расход воздуха в диапазоне $G = (0.017–0.035)$ г/с, то это вызывает перестроение формы разряда, а вместе с этим изменяется и распределение внутренних источников тепла, и температурное поле внутри разрядной камеры. Разряд из объемной формы переходит в шнуровую и локализуется вблизи внутренней поверхности цилиндрического канала. В результате температура газа в центре цилиндрического канала резко уменьшается до 300 К и в дальнейшем не изменяется с увеличением мощности разряда до $N = 80$ Вт. На температуру газа вблизи внутренней поверхности цилиндрического канала поток газа в указанном диапазоне расхода слабо влияет и экспериментальные данные хорошо описываются одной прямой. Средняя скорость повышения температуры в этом случае составляет 3 К/Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье экспериментально измерены температуры газа в продольном тлеющем разряде в следующем диапазоне параметров: $P = (2.5–5.5)$ кПа; $G = (0–0.035)$ г/с, $I = (30–80)$ мА, $N = (30–80)$ Вт. Температура газа измерялась контактным методом с помощью остеклованных хромель-алюмелевых термопар в шести точках непосредственно в зоне разряда, а также

на входе и выходе газа из разрядной камеры. Приведены зависимости температуры газа от тока разряда и вкладываемой в него мощности. При небольших расходах газа; $G = (0–0.007)$ г/с разряд осесимметричен и с увеличением силы тока температура газа в центре повышается примерно по линейному закону со средней скоростью 4 К/мА. Радиальный перепад температур увеличивается с ростом давления от 200 К при давлении $P = 2.5$ кПа до 240 К при давлении $P = 5.5$ кПа. Зависимость температуры газа от мощности разряда аналогичная. Возрастание происходит по линейному закону со средней скоростью 5 К/Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 1992. Москва: Наука.
2. Yunusov R.F. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 789. P. 012069.
3. Timerkaev B.A., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012036.
4. Kiselev A.S. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 789. P. 012027.
5. Ramazanov A.N. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 729. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/729/1/012004>
6. Yunusov R.F., Garipov M.M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012076.
7. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1058. P. 012051.
8. Yunusov R.F., Garipov M.M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1328. P. 012102.
9. Tazmeev K.K., Tazmeev A.K., Dautov I.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1588. P. 012051.
10. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Symmetry. 2021. V. 13 (6). P. 927.
11. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. С. 63.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Appl. Sci. 2023. V. 13 (9). P. 5538.
13. Tazmeev G.K., Tazmeev K.K., Timerkaev B.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1588. P. 012049.

Impact of Glow Discharge Energy Characteristics on Gas Temperature

R. F. Yunusov^{1, *}, Z. D. Zakirov¹, and E. R. Yunusova²

¹Tupolev Kazan National Research Technical University—KAI, Kazan, 420111 Russia

²City Clinical Hospital no. 7, Kazan, 420103 Russia

*e-mail: optanir@mail.ru

Received June 14, 2023; revised July 26, 2023; accepted August 1, 2023

Abstract—The paper examines experimentally the dependence of gas temperature in a glow discharge on gas-dynamic flow parameters and discharge energy parameters. The gas pressure P and its flow rate G in the discharge chamber varied from 2.5 to 5.5 kPa and from 0 to 0.035 g/s, respectively. The discharge current strength I and the power input N to the discharge also ranged from 30 to 80 mA and from 30 to 80 W. The gas temperature was measured by the thermocouple method at six points of the discharge gap, which also made it possible to estimate the change in gas temperature along the axis of the cylindrical channel and along its radius. At low gas consumption, the discharge was found to be axisymmetric and fill the entire volume of the

discharge gap. As the current and discharge power increased, the gas temperature increased approximately linearly with an average rate of 5 K/W. With increasing air flow rate G from 0.017 to 0.035 g/s, the discharge rearranged from a bulk shape to a cord shape, and the temperature field of the discharge changed significantly: in the center of the discharge, the temperature decreased sharply and practically did not change with increasing discharge power, while near the discharge localization, the gas temperature increased linearly with increasing power at an average rate of 3 K/W.

Keywords: glow discharge, discharge chamber, gas temperature, thermocouple, current intensity, discharge power, gas pressure, gas-flow rate