

где $v(x)$ — безразмерная мощность

$$v(x) = \begin{cases} x & (0 \leq x \leq 1/2) \\ 1-x & (1/2 \leq x \leq 1) \\ 0 & (1 < x) \end{cases}$$

Уравнения (14) интегрировались численно на машине с начальными условиями $y(0) = y_0$, $y'(0) = 0$, и затем находились зависимости $p(t)$ на различных расстояниях по формулам (5), (6).

Положение ударного фронта и амплитуда ударной волны определялись графически по правилу «равенства площадей».

Рассчитанные зависимости профиля давления в волне сжатия показаны на фиг. 1—4 (кривые 1), там же показаны имеющиеся экспериментальные результаты [2,8] (кривые 2).

На фиг. 1 показан профиль давления в точке, отстоящей на расстоянии 1 м от разрядного промежутка для разряда с параметрами: выделившаяся энергия $E = 3 \cdot 10^4$ Дж, длительность разряда $T = 9$ мксек.

На фиг. 2 и 3 показана зависимость $p(t)$ в точках, отстоящих на расстоянии 1 и 10 м соответственно от разряда с параметрами $E = 2.5 \cdot 10^3$ Дж, $T = 40$ мксек [8]; при построении графиков на фиг. 2 ударные фронты, определенные экспериментально и рассчитанные, были совмещены.

На фиг. 4 изображен профиль волны сжатия на расстоянии $1/2$ м от разряда с параметрами $E = 102$ Дж, $T = 50$ мксек, исследованного в [2]. В отличие от двух предыдущих разрядов, ударные волны в этом случае практически не образуются. Кривой 3 на фиг. 4 показана зависимость $p(t)$, полученная в приближении линейной акустики.

Авторы благодарят Ю. П. Райзера, В. А. Акуличева, Ю. Я. Богуславского и Н. Г. Кожелупову за внимание и помощь в работе.

Поступила 22 III 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе А. И., Наугольных К. А., Рой Н. А. О начальной стадии электрического разряда в воде. ПМТФ, 1964, № 4, стр. 108.
2. Наугольных К. А., Рой Н. А. Точечный электрический разряд в жидкости. ПМТФ, 1967, № 4.
3. Cole R. H. Underwater explosion. Princeton, 1948. Русск. перевод. Коул. Подводные взрывы. Изд. иностр. лит., М., 1950.
4. Акуличев В. А., Богуславский Ю. Я., Иоффе А. И., Наугольных К. А. Распространение сферических волн конечной амплитуды. Акустич. ж., 1967, т. 13, стр. 321.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1954.
6. Whitham G. B. On the propagation of weak shock waves. J. Fluid. Mech. 1956, т. 2, стр. 303.
7. Скворцов Ю. А., Комельков В. С., Кузнецов Н. М. Расширение канала искры в жидкости. Ж. техн. физ. 1960, т. 30, стр. 1165.
8. Наугольных К. А., Рой Н. А. О связи между гидродинамическими и электрическими характеристиками разряда в жидкости. Докл. АН СССР, 1959, т. 168, стр. 556.

ОБ ОДНОМ КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ

Г. Ю. Даутов

(Новосибирск)

Известный закон Пашена об электрическом пробое, являющийся результатом применения методов теории подобия и размерности к электрическому разряду в неподвижном газе, сыграл большую роль в обобщении экспериментальных данных по пробое [1]. В последнее время эти методы стали применяться к обобщению результатов экспериментальных исследований электрических дуг [2—5]. В данной работе предлагается весьма простой критерий подобия, который может быть применен к различным видам электрических разрядов в канале с потоком газа.

Обозначения

G — секундный массовый расход газа через канал;	v — скорость направленного движения частиц;
I — ток разряда;	U — напряжение дуги;
e — абсолютное значение заряда электрона;	V — массовая скорость движения газа;
n — концентрация частиц;	d, s — диаметр и площадь поперечного сечения канала;
m — масса частицы;	U_s — потенциал пробоя между столбом дуги и электродом-каналом.
ez — заряд иона;	
p — давление;	

Индексы e, i, a относятся соответственно к электронам, ионам и молекулам исходного газа, а n — к проекции скорости на нормаль к элементу площади ds .

1. Рассмотрим канал с потоком газа, в направлении оси которого течет ток электрического разряда какого-либо вида. В частности, таким разрядом может быть электрическая дуга. Допустим, что расход газа через канал такой, что его влиянием на разряд нельзя пренебречь. Это влияние может быть описано при помощи ряда критериев подобия. Одним из них может служить предлагаемый здесь критерий

$$\Pi = m_a I / eG \quad (1.1)$$

Выясним физический смысл этого критерия. Для простоты будем считать, что радиальная составляющая тока равна нулю. Тогда электрический ток определяется как поток заряда через площадь поперечного сечения канала

$$I = e \int_s \left\{ \sum_z [zn_i(z) v_{in}(z)] - n_e v_{en} \right\} ds \quad (1.2)$$

Из (1.2) находим

$$\frac{I}{e} = \int_s \left\{ \sum_z [zn_i(z) v_{in}(z)] - n_e v_{en} \right\} ds \quad (1.3)$$

Из (1.3) видно, что I/e представляет собой поток зарядов величины e через площадь s . Если плазма нейтральна и скорости направленного движения для всех ионов одинаковы и близки к массовой скорости плазмы, т. е.

$$\sum_z zn_i(z) = n_e, \quad v_{in} = V_n$$

выражение для I/e значительно упрощается и записывается в виде

$$\frac{I}{e} = \int_s n_e (V_n - v_{en}) ds$$

Отсюда видно, что в последнем случае I/e — поток электронов через площадь, равную s и движущуюся вместе с газом из тяжелых компонентов плазмы (ввиду малости m_e по сравнению с массой других частиц, вкладом электронов в массовую скорость плазмы можно пренебречь).

Поток молекул исходного газа до его взаимодействия с разрядом равен

$$\frac{G}{m_a} = \int_s n_a v_{an} ds$$

Таким образом, критерий (1.1) представляет собой отношение потоков зарядов величины e и молекул исходного газа через площадь поперечного сечения канала. Следует отметить, что Π отражает весьма важные физические процессы в электрических разрядах. В частности, в случае электрической дуги n_e, n_a, v_e — такие основные параметры, которые определяют плотность тока, напряженность электрического поля и, следовательно, плотность выделяемого джоулева тепла. А поток нейтральных частиц характеризует не только перенос массы, но и конвективный перенос тепла при заданной температуре. Таким образом, энергетический баланс столба дуги в потоке газа зависит от Π . Кроме того, входящие в Π величины существенно влияют на термодинамические и переносные свойства дуговой плазмы, процессы возбуждения, ионизации, излучения и т. д.

При сравнении разрядов в газах одинакового исходного состава входящие в критерий физические константы, такие, как m_a, m_e и т. д., могут быть отброшены. Получаемые таким путем размерные комплексы суть переменные части соответствующих

критериев подобия и более удобны, с точки зрения сокращения расчетных работ при обработке экспериментальных данных и пользовании полученными обобщенными характеристиками. В данном случае таким размерным комплексом будет величина I/G , совпадающая с переменной частью одного из критериев [4].

Важную роль часто играет влияние электрического разряда на движение и свойства газа. Такая ситуация имеет место в плазмотронах, устройствах для гашения дуг и т. д. Очевидно, предложенный критерий может быть использован и при рассмотрении газодинамических и других свойств потока газа при взаимодействии с электрическим разрядом.

2. Поскольку любая степенная комбинация критериев также является критерием подобия, им можно придавать различные формы. Поэтому экспериментальные данные могут быть обработаны в различных системах критериев или размерных комплексов. Так, например, обработка вольт-амперных характеристик самоуставляющейся дуги при помощи различных систем приводит к приближенным формулам

$$\frac{Ud}{I} = 1170 \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{-1.05} \left(\frac{I}{G} \right)^{0.68} (pd)^{0.1} \quad (2.1)$$

$$\frac{Ud}{I} = 1170 \left(\frac{I}{G} \right)^{-1.42} \left(\frac{G}{d} \right)^{-1.05} (pd)^{0.1}, \quad \frac{Ud}{I} = 1170 \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{-0.1} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0.34} (pd)^{0.1}$$

Здесь $30 < I < 170$ а; $2 < G < 25$ г/сек; $1 < d < 3.5$ см; $G/d < 10$ г/сек см; $10 < p < 30$ н/см²; U — в в; рабочая среда — воздух; стенка канала — анод; внутренний торцевой электрод — катод.

Исходя из формул (2.1), можно сделать некоторые выводы. Как видно из них, говорить о степени влияния критерия (или его переменной части) на какое-либо свойство разряда (в данном случае — на напряжение дуги) можно, лишь имея в виду определенную систему критериев. Так, например, зависимость напряжения дуги от комплекса G/d при использовании различных систем различна. Следовательно, роль критерия будет однозначной только при задании полного набора критериев, описывающих разряд.

Второй вывод касается потенциала пробоя между столбом дуги и электродом-каналом. Как известно [3], напряжение самоуставляющейся дуги определяется упомянутым пробоем, т. е. величиной U_s . Поэтому, учитывая зависимость U от I/G , G/d и pd , можно утверждать, что U_s зависит от этих же комплексов

$$\frac{U_s d}{I} = f \left(\frac{I}{G}, \frac{G}{d}, pd \right) \quad (2.2)$$

Таким образом, в отличие от закона Пашена о пробое, при наличии дуги и потока газа U_s зависит не только от pd , но еще от I/G и G/d .

Поступила 15 VI 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. Изд. иностр. лит., 1960.
2. Кутателадзе С. С., Ясько О. И. Обобщение характеристик электродуговых подогревателей. Инж.-физ. ж. 1964, т. 7, № 4.
3. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг. ПМТФ, 1965, № 2.
4. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф. Критериальное обобщение характеристик плазмотронов вихревой схемы. ПМТФ, 1965, № 6.
5. Коротеев А. С., Ясько О. И. Некоторые вопросы обобщения в безразмерных критериях характеристик обдуваемых дуг. Инж.-физ. ж. 1966, т. 10, № 1.