

## Краткие сообщения

04;12

### Метод получения ударных волн большой интенсивности электрическим разрядом в газах

© К.В. Корытченко, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец, М.А. Острижной, В.И. Чумаков

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники,  
61166 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 13 марта 2002 г.)

Предложено и экспериментально опробовано устройство для получения ударных волн большой интенсивности при малых энергиях электрического разряда в газе.

Проблема получения ударных волн большой интенсивности за счет электрического разряда в газах возникает в результате неравновесного распределения энергии молекул газа по степеням свободы. Экспериментальные результаты показывают, что более 95% энергии разряда сосредоточивается в виде колебательной энергии молекул газа, в то время как источником формирования ударной волны является кинетическая энергия. Кроме того, часть энергии разряда затрачивается на диссоциацию и ионизацию молекул газа.

Если, например, необходимо создать ударную волну в воздухе при нормальных условиях со скачком давления на фронте, равном  $10^7$  Па, то соответственно локальное давление, создаваемое за счет электрического разряда, должно быть по величине также не менее  $10^7$  Па. Исходя из классических законов термодинамики, кинетическая температура молекул газа в зоне разряда при этом должна достигнуть величины не менее 30 000 К. Фактически же за счет практически полного процесса диссоциации молекул воздуха необходимое давление достигается при кинетической температуре около 15 000 К, при этом удельная теплоемкость воздуха возрастает более чем в 4 раза. Если бы даже происходило термодинамически равновесное распределение энергии разряда в молекулах воздуха, то необходимая энергия разряда возросла бы в несколько раз. Из-за малого периода формирования ударной волны (соизмеримого с временем свободного пробега молекулы) рост локального давления обеспечивается сокращением длительности разряда. Рост энергии разряда при одновременном сокращении его длительности приводит к возрастанию электронной температуры разряда и соответственно к более интенсивному поглощению энергии молекулами в виде внутренней энергии (колебательной и электронной) с протеканием процессов диссоциации и ионизации, что вынуждает еще больше повышать энергию разряда.

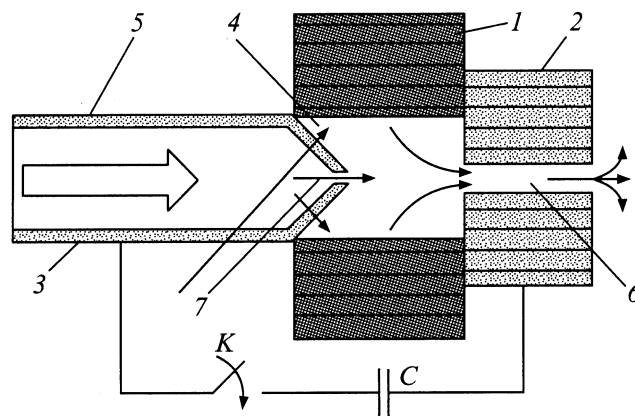
При разряде в открытом пространстве лишь незначительная часть энергии (до 3%) затрачивается на формирование ударной волны. Кроме того, с ростом объемной мощности энерговыделения эффективность преобразова-

ния энергии разряда в ударную волну после незначительного роста уменьшается.

Таким образом, с целью получения ударных волн большой интенсивности электрическим разрядом нужно разрешить противоречие между необходимостью осуществления значительного энерговыделения в короткий промежуток времени и обеспечением эффективного преобразования энергии разряда в кинетическую энергию молекул газа.

Рассмотрим метод получения ударных волн большой интенсивности при малых энергиях электрического разряда за счет формирования направленной ударной волны и использования динамических свойств газовых потоков. Для решения указанной задачи используется устройство, схема которого показана на рисунке.

Устройство работает следующим образом. Через проводник 3 по подающему каналу 5 из отверстия 7 в полость 4 изолятора 1 от внешнего источника под давлением подается охлажденный воздух. Геометрические размеры выходного канала 6 и падающего канала 5



Устройство для создания ударных волн электрическим разрядом в газе: 1 — изолятор, 2 — проводник, 3 — подводящий проводник, 4 — полость, 5 — подающий канал, 6 — выходной канал, 7 — отверстие.

Параметры за фронтом ударной волны в воздухе при нормальных условиях перед фронтом при  $P_0 = 10^5$  Па,  $T_0 = 293$  К

Температура $T, \text{К}$	Скорость $D, \text{м/с}$	Давление $P_1, 10^5 \text{ Па}$	Плотность $\rho_1/\rho_0$
3840	2935	100	6.76

с отверстиями 7 подбираются таким образом, что в полости 4 изолятора 1 образуется повышенное давление по отношению к давлению внешней среды. Дальнейшее падение давления воздуха до внешнего давления происходит в канале 6 и за его срезом. Максимальная скорость течения газа по каналу 6 не может превышать критической скорости звука  $C_{*2}$ . Скорость распространения возмущений в газе будет изменяться в пределах от  $C_0$  до  $C_{*2}$  ( $C_0$  — скорость звука заторможенного потока) [1].

В результате электрического разряда емкостного накопителя через коммутатор  $K$  в полости 4 часть энергии разряда перейдет непосредственно в кинетическую энергию, что приведет к росту давления в полости 4 и по каналу 6 начнет распространяться волна сжатия. Движению газа в сторону канала 5 препятствует давление поступающего газа. Так как скорость перехода энергии из колебательной в кинетическую прямо пропорциональна давлению газа, то в полости в результате процессов дезактивации происходит дальнейший рост давления, а по каналу по уже частично прогретому газу с большей скоростью будут распространяться волны сжатия с нарастающей амплитудой, что приведет к формированию ударной волны. Этот процесс аналогичен процессу формирования ударной волны в детонационных трубах [2].

На основании теории колебательной дезактивации молекул газа [3] с учетом условий формирования ударных волн в детонационных трубах и свойств газов разработана методика расчета параметров описанного устройства.

Приведенная конструктивная схема позволяет увеличить время формирования ударной волны, что позволяет более эффективно использовать энергию разряда путем увеличения продолжительности разряда с осуществлением его в области повышенного давления газа.

Проведя оценку параметров устройства, обеспечивающего формирование ударной волны с интенсивностью и в условиях, соответствующих вышеизложенному примеру, получим (см. таблицу).

Для создания ударных волн в детонационных трубах необходимо обеспечить сохранение ламинарности течения потока при всех режимах истечения. По опытным данным известно, что при устранении возмущений у входа в трубу удается поддерживать ламинарное течение вплоть до значения числа Рейнольдса  $R = 10^5$ , где  $R = U_{\max} d / 2\nu$ ,  $U_{\max}$  — скорость жидкости на оси трубы,  $d$  — диаметр трубы,  $\nu$  — кинетическая вязкость газа. ( $U_{\max}$  в нашем случае соответствует скорости переднего фронта ударной волны  $D$ , а  $d$  — диаметру выходного

канала). Максимальную температуру нагрева  $T_1$  в полости изолятора определим из условия равенства максимальной скорости течений разогретого потока воздуха критической скорости звука  $C_{*2}$

$$T_1 = \frac{C_{*2}^2 \cdot M \cdot (\gamma + 1)}{2\gamma \cdot R} = \frac{D^2 \cdot M(\gamma + 1)}{2\gamma \cdot R},$$

где  $M$  — молярная масса газа, кг/моль,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Длительность разряда определится из времени формирования ударной волны  $t$

$$t = \frac{l}{C_{01}} - \frac{l}{C_{02}},$$

где  $l$  — длина выходного канала;  $C_{01}$ ,  $C_{02}$  — скорости звука заторможенного потока соответственно при начальных условиях и в разогретом электрическом разрядном газе.

Если, например,  $d = 0.001$  м,  $l = 0.0015$  м, то получим  $R \approx 10^4$ ,  $T_1 = 11\,100$  К,  $t = 4 \cdot 10^{-5}$  с. Для сравнения: время формирования ударной волны в открытом пространстве в воздухе при нормальных начальных условиях составляет не менее  $10^{-8}$  с.

Рассматриваемое устройство может быть использовано в качестве инициатора детонационных волн, осуществляющего детонацию в частотном режиме (с максимальной частотой не менее 500 Гц) в разработанных ранее сверхзвуковым газодинамическом пульсирующем лазере или в прямоточно-пульсирующем воздушно-реактивном двигателе [4]. Кроме того, данный метод позволяет изменить конструкцию ударных и детонационных труб и соответственно применять полученные на его основе технические устройства в исследовательских целях и в технологических процессах.

## Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
- [2] Баум Ф.А., Станюкович К.Л., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: ФТЛ, 1959.
- [3] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФТЛ, 1963.
- [4] Патент Украины № 2000084769 от 10.08.2000.