

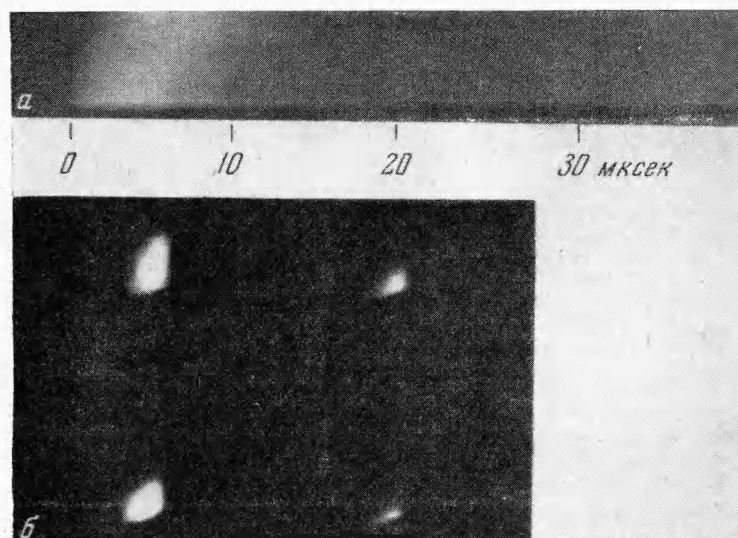
О СГУСТКЕ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УДАРНЫХ ТРУБАХ

Е. Ф. Лебедев, В. П. Фомичев

(Новосибирск)

В настоящее время многих исследователей интересуют процессы в электроразрядных ударных устройствах, позволяющих получить движущийся ионизованный газ.

Рядом авторов обнаружено, что плазма разряда может двигаться через газ в канале, не накапливая перед собой ударнонагретую плазму до некоторого расстояния от разрядной камеры [1-5]. Этот эффект, как правило, имел место при начальных давлениях, меньших 1 мм рт. ст. и разрядных токах больше 10^5 а,



Фиг. 1. а, б — фоторазвертка и покадровая съемка движения сгустка в трубе на расстоянии 90 см от разрядной камеры; время между кадрами 2,6 мксек

при этом число Маха превышало 20—30; отметим, что род газа, а также тип разрядной камеры мало существенны. При увеличении начального давления или снижении величины разрядного тока плазма разряда уже значительно ближе к разрядной камере начинает двигаться как непроницаемый поршень, образуя перед собой ударную волну [1,2,4,6,7]. В этом случае можно ожидать согласия эксперимента с теорией прямого скачка [4,6,7]. В случае же, когда ударнонагретую плазму не удается обнаружить в чистом виде, величины параметров плазмы значительно отличаются от расчетных для ударной волны [1,4,5]. Ниже приводятся некоторые результаты исследования сгустка плазмы при непрекратившемся разряде на расстоянии 60÷90 см от разрядной камеры. Эти результаты подтверждают предположение об отсутствии четкого разграничения между термической плазмой и плазмой непрекратившегося разряда.

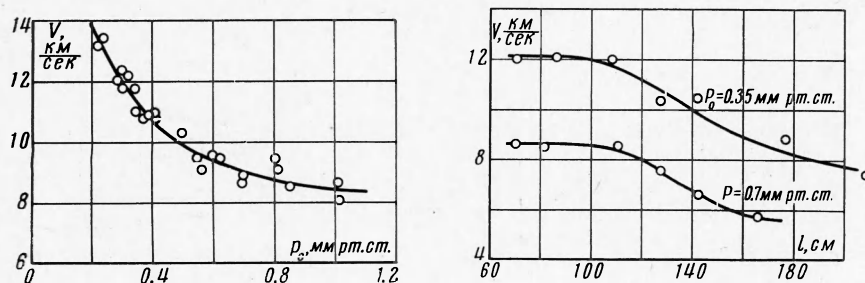
При исследовании магнитогидродинамических явлений в плазме важным параметром является магнитное число Рейнольдса, или, как его составная часть, электропроводность плазмы σ . В настоящей работе измерены значения σ для сгустка плазмы, полученного в электроразрядной трубе с T -источником в воздухе при начальных давлениях $p_0 = 0.2\text{—}1.0$ мм рт. ст. и скоростях сгустка 8—13 км/сек. В этих же условиях получены экспериментальные величины давления в сгустке.

Сгусток плазмы получался в T -образной ударной трубе диаметром 4 см при разряде батареи конденсаторов ($C = 1200$ мкф и $U = 5$ кВ). Скорость сгустка определялась по фоторазверткам и покадровой съемке камерой СФР (фиг. 1) и при помощи специального магнитного индукционного измерителя, который представлял собой два магнитных зонда, расположенных вблизи движущейся плазмы, разнесенных на базе 100 мм и находящихся в отдельных постоянных магнитных полях, перпендикулярных течению. Сигналы с этих зондов, вызванные деформацией поля проходящей плазмой, записывались на осциллографе ОК-17м.

В отличие от фоторазверток, регистрирующих скорость яркостного «фронта» сгустка, при помощи индукционного измерителя определялась скорость области максимальной

проводимости сгустка, однако величины скоростей, полученные этими двумя методами, совпадают с хорошей точностью (фиг. 2а). Покадровой съемкой при помощи СФР подтверждено отмеченное в литературе отсутствие плоского фронта сгустка (фиг. 1, б). Длина «языков» достигает 1—2 см.

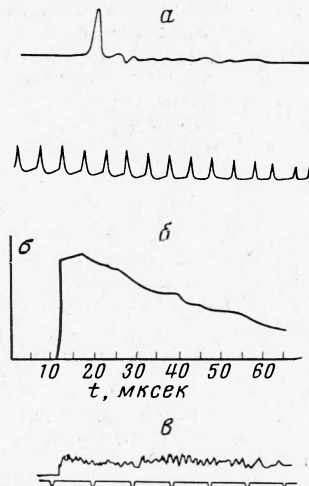
Электропроводность сгустка измерялась в кварцевом отсеке трубы на расстоянии 90 см от T -источника методом вытеснения стационарного магнитного поля движущейся плазмой [8]. Разрешающая способность примененного измерительного устройства



Фиг. 2. а—зависимость скорости движения переднего фронта светящегося сгустка от начального давления ($l = 70$ см); б—изменение скорости движения сгустка по длине трубы, l — расстояние от разрядной камеры

по длине сгустка составляла 3 см. Это устройство не регистрирует «языки» сгустка, так как σ -сигнал пропорционален примерно четвертой степени диаметра проводящей области, а диаметр «языка» меньше диаметра канала, по крайней мере, вдвое. По этой причине определяется значение электропроводности сгустка, усредненное по внешнему кольцу (толщиной около $1/3$ радиуса) сечения трубы. Внутренняя часть сгустка практически не взаимодействует с магнитным полем измерительной системы, если только электропроводность этих внутренних слоев не намного превышает электропроводность внешних слоев сгустка, что имеет место, очевидно, в рассматриваемом случае.

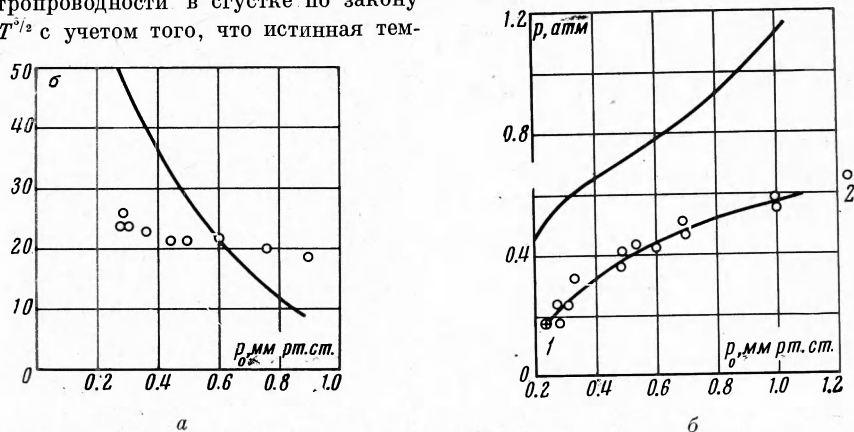
По фоторазверткам течения за фронтом сгустка установлено, что скорость движения плазмы в сгустке можно считать постоянной до расстояний 30—40 см от головной части сгустка. Поэтому интеграл от полученных σ -сигналов по результатам рабо-



Фиг. 3. а, б — сигнал σ и примерный ход проводимости, $p_0 = 0.44$ мм рт. ст.; в — сигнал с пьезодатчика, $p_0 = 0.33$ мм рт. ст. Метки времени: а и б — 5 мксек; в — 10 мксек

ты [8] непосредственно характеризует изменение электропроводности вдоль сгустка (с учетом искажений, вызванных разрешающей способностью измерительного устройства). Осциллограммы σ -сигналов приведены на фиг. 3, а и б. Достигая своего максимального значения сразу в головной части сгустка или на длине до 2—3 см от нее, электропроводность в дальнейшем уменьшается, падая примерно вдвое на расстоянии 20—40 см от начала сгустка. С увеличением начального давления спад происходит медленнее. Характерно наличие небольших по величине колебаний σ на этом участке. Максимальные значения электропроводности определены по полученным осциллограммам тарировкой измерительной системы металлическим цилиндром и представлены для разных начальных давлений на фиг. 4, а. Скорость сгустка, необходимая для подсчета величины σ , измерялась индукционным измерителем в каждом эксперименте (фиг. 2, а). Для оценки полученных результатов рассчитывалась величина электропроводности в пробке газа за плоской ударной волной, движущейся со скоростью сгустка в предположении постоянства длины свободного пробега электронов [9]. Экспериментальные значения σ° существенно отличаются от расчетных σ ($\sigma^\circ = 1/2\sigma$) при $p_0 = 0.3$ мм рт. ст.; $\sigma^\circ \approx 2\sigma$ при $p_0 = 1$ мм рт. ст.).

Вследствие явно имеющейся неоднородности сгустка измеренные величины σ° могут быть ниже локальных значений электропроводности. Если провести оценку электропроводности в сгустке по закону $\sigma \sim T^{3/2}$ с учетом того, что истинная тем-



Фиг. 4. а—расчетная кривая максимальных значений электропроводности [$\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$] в плазме за ударной волной и результаты эксперимента; б—расчетные значения давления в воздухе за ударной волной (верхняя кривая) и результаты эксперимента. 1 — точка взята из работы [5]; 2 — точка взята из работы [4]

пература в сгустке согласно [5] близка к $1.5T$, где T — расчетная температура за фронтом плоской ударной волны, то получим значение $\sigma^\circ \sim 2\sigma$, которое получено в данном эксперименте при $p_0 \geq 1 \text{ мм рт. ст.}$

При этих же начальных давлениях наблюдается уменьшение неоднородности в сгустке, регистрируемое СФР.

Давление в сгустке плазмы измерялось на расстоянии 65 см от T -источника. Следует отметить, что и давление, и электропроводность измерялись на участке трубы, где сгусток меняется незначительно (фиг. 2, а).

Использованный пьезодатчик, аналогичный описанному в работе [10], имел пьезо-керамику ЦТС-19 диаметром 3 мм и толщиной 1 мм. Точность измерений давления около 10%.

При обработке осциллограмм давления (фиг. 3, в) определялась средняя величина его, остающаяся постоянной значительное время. На фиг. 4, б, показана зависимость этой величины от начальных давлений. Экспериментальные величины давлений примерно в два раза ниже расчетных значений за фронтом плоской ударной волны, движущейся с той же скоростью, что и сгусток [11]. С повышением p_0 эта разница увеличивается.

В работе [5] имеются результаты измерения давления в ударной трубе с коаксиальной разрядной камерой при $p_0 = 0.2 \text{ мм рт. ст.}$ Наши измерения давления при $p_0 = 0.2 \text{ мм рт. ст.}$ совпадают с измерениями работы [5] (следует напомнить, что в нашем случае применялся T -источник плазмы).

Если считать, согласно оценкам работы [12], что плотность газа в пробке равна $1/3$ расчетной для одномерной ударной волны, то область сжатого ударной волной газа должна иметь длину в пределах 15—25 см. Эта величина согласуется с длиной светящейся области, полученной из СФР-грамм (фиг. 1, а). Однако резкое уменьшение электропроводности, которое должно было бы наблюдаться за контактной поверхностью, отсутствует, и величина σ в этом месте составляет около 0.5 от максимальной. Это подтверждает предположение об отсутствии четкого разграничения между термической плазмой и плазмой разряда.

Поступила 14 VII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Cloupeau. Interpretation of luminous Phenomena Observed in Electromagnetic Shock Tubes. Phys. Fluids., 1963, vol. 6, No. 5.
2. Brinkshulte H., Munttenbruch H. Interferometrische Untersuchungen on elektromagnetische beschleunigten Stoßwellen. Z. Naturforsch., a, 1965, B. 20, No. 2.
3. Chang C. T. Shock Wave Phenomena in Coaxial Plasma Cuns. Phys. Fluids. 1961, vol. 4, No. 9.

4. Макаров Ю. В., Максимов А. М. Исследование структуры ударных волн в электромагнитной ударной трубе. Ж. техн. физ., 1965, № 4.
5. Воротникова М. И., Солоухин Р. И. О структуре потока в электро-разрядных ударных трубах. ПМТФ, 1964, № 5.
6. Ahlstrom H. C. Observations of shock Waves in on Electrically Driven Shock Tube. Phys. Fluids., 1964, vol. 7, No. 6.
7. Fucks W., Czech T. Plasma Motion and Shock Waves in O-pinch Operated Shock Tubes. Phys. Fluids., 1965, vol. 8, No. 1.
8. Лин, Реслер, Кантровиц. Электропроводность высокоионизованного аргона в ударной волне. Вопросы ракетной техники, 1956, т. 1 (31).
9. Нагомацу Х., Шир Р. МГД — исследование диссоциированной и ионизованной воздушной плазмы. Сб. «МГД-метод преобразования энергии», Физматгиз, 1963.
10. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. Физматгиз, 1963.
11. Термодинамические функции воздуха для температур от 1000 до 12 000° K и давлений от 0.0001 до 1000 атм. Изд-во АН СССР, 1960.
12. Mc Sean E., Faneuft G., Kolb A., Griem H. Spektroskopie Study of Helium Plasmas Produced by Magnetically Driven Shock Wave. Phys. Fluids., 1960, vol. 3, No. 6.

СЖАТИЕ ПЛАЗМЕННОГО ВИТКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Ю. П. Ладиков

(Орск)

В статьях [1,2] исследовались условия возникновения и равновесия плазменного витка с током в аксиально-симметрическом переменном магнитном поле. Плазменное кольцо с током возникало в результате безэлектродного разряда в газовой камере при давлениях от 0.01 до 0.5 мм рт. ст. При этом в теоретическом расчете, произведенном в статье [1], учитывались только электромагнитные явления, а газодинамические эффекты во внимание не принимались. Между тем, если предположить, что плазменное кольцо с током является к тому же вихревым кольцом, эти эффекты могут быть в какой-то мере учтены. Такое предположение является вполне естественным, так как в зоне протекания тока не может не возникнуть вихревое движение.

Исследуем вопрос сначала с качественной стороны. Допустим, что в газе образовалось вихревое кольцо с током (фигура), магнитные силовые линии и линии тока вихревого течения направлены так, как показано на фигуре. Текущий по кольцу ток вызывает в нем магнитное поле, которое определяется по закону Био и Савара

$$\mathbf{H} = Ic^{-1} \text{grad } \omega$$

Здесь $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, c — скорость света, ω — телесный угол, под которым видно кольцо из той точки, где определяется напряженность, I — сила тока. Поскольку скорость газа вне кольца определяется так же, как и магнитное поле, — по закону Био и Савара, то скорость и магнитная напряженность будут коллинеарными векторами

$$\mathbf{H} = \kappa \sqrt{4\pi} \mathbf{v}$$

Легко видеть, что напряженность и скорость в точках, близких к точкам B и B' , будет больше, чем в точках, близких к точкам C и C' , так как $\omega(B) > \omega(C)$. Гидродинамическое давление окружающей жидкости вычисляется по закону Бернулли

$$p = p_{\infty} - \frac{1}{2} \rho v^2$$

Поэтому в точках C и C' гидродинамическое давление будет больше, чем в точках B и B' . Соответственно магнитное давление $\frac{1}{8} H^2 / \pi$ будет больше в точках B и B' . Отсюда следует, что если магнитная энергия M превышает кинетическую K , то кольцо будет растягиваться, в противном случае — сжиматься. Будем полагать, что $M > K$. Кольцо начнет растягиваться. При этом скорость в точках D и D' будет меньше, чем в точках E и E' , и следовательно, давление будет больше. В результате этого кольцо начнет движение вправо с возрастающей скоростью, пока набегающий поток не компен-

