

УДК 533.95:538.4+533.9.07

ФИЗИКА

А. Ю. КЕРКИС, В. С. СОКОЛОВ, Н. А. ТРЫНКИНА, В. П. ФОМИЧЕВ
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА
ТОКОВОГО СЛОЯ**

(Представлено академиком А. Н. Тихоновым 2 X 1972)

В (¹, ²) и ряде других публикаций на основе численного решения уравнений магнитогидродинамики было показано, что при движении в магнитном поле сжимаемой среды, электропроводность которой растет с увеличением температуры, в среде могут возникать самоподдерживающиеся зоны повышенной плотности тока, температуры и электропроводности (токовые слои — Т-слои), существование которых приводит к увеличению эффективности магнитогидродинамического взаимодействия. Была выявлена возможность как иницированного (²), так и самопроизвольного (¹) зарождения токовых слоев.

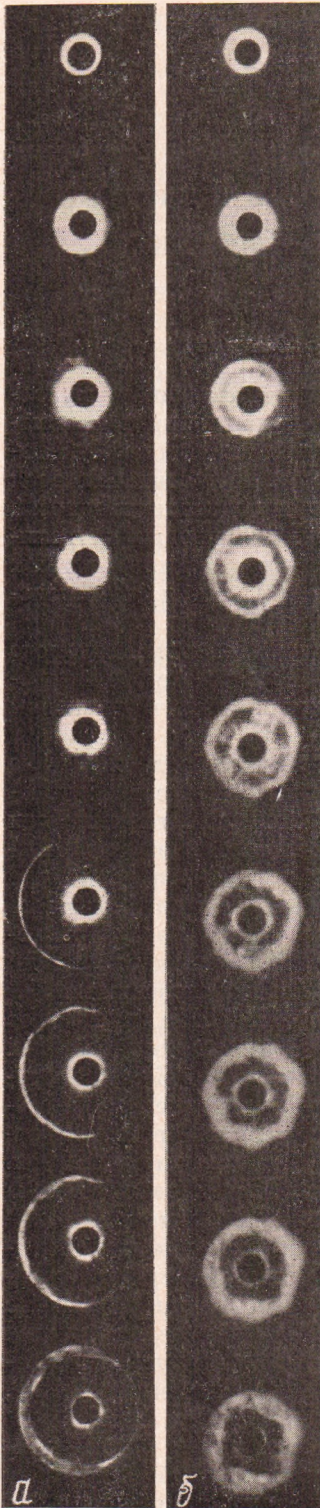
В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального обнаружения и исследования указанного эффекта в режиме его самопроизвольного возникновения в процессе расширения плазмы в дисковом канале при наличии поперечного магнитного поля.

Эффект токового слоя, наблюдаемый в эксперименте, содержит, по нашему мнению, все основные моменты, предсказываемые теорией: локализация электрического тока в газе, повышение в этой зоне температуры и электропроводности, усиление магнитогидродинамического взаимодействия и, наконец, существование для каждого режима течения критического значения магнитного поля такого, что, если действительная напряженность поля меньше критической, то эффект не возникает. Кроме того, в эксперименте получен новый, принципиально важный результат, указывающий на устойчивость токового слоя как пространственного образования.

Экспериментальные исследования проводили на установке, подробное описание которой имеется в (³). Источником плазмы служит коаксиальный разрядник, на который разряжается батарея конденсаторов. Круглая труба длиной 350 мм и диаметром 55 мм, являющаяся продолжением разрядника, оканчивается дисковым каналом, образующие стенку которого перпендикулярны к оси трубы. Диаметр дискового канала 250 мм, ширина 20 мм. Магнитное поле, силовые линии которого в пределах дискового канала параллельны оси симметрии установки, создавалось электромагнитом постоянного тока. Внутренний диаметр магнита равен диаметру канала, стенки канала изготовлены из прозрачного оргстекла. Система измерений включала в себя скоростную фотосъемку с помощью СФРЛ, одновременное использование до десяти пьезодатчиков давления, такого же количества магнитных зондов, специально разработанные датчики для прямого измерения плотности тока в плазме (с пространственным разрешением 5 мм), кроме того измерялась напряженность электрического поля.

Эксперимент проводился на воздухе с начальным давлением 0,7–1 мм рт. ст. Скорость движения плазмы в прямой трубе достигала 20 км/сек, скорость расширения в дисковом канале без магнитного поля 10 км/сек. Изменяемым параметром в исследованиях было магнитное поле, напряженность которого менялась от эксперимента к эксперименту в пределах от 0 до 4000 э.

Рис. 1. Покадровая съемка процесса расширения плазмы в дисковом канале; время между кадрами 2,66 мсек. *a* — $H = 0$ (на последних кадрах видно свечение отраженной от конца канала ударной волны), *б* — $H = 3000$ э. Во избежание засветки пленки излучением из разрядника центральная часть дискового канала сделана непрозрачной (темный диск в центре кадров)



На рис. 1, 2 представлены наиболее характерные результаты эксперимента для очень слабого магнитного поля (меньше 1000 э) и для поля с напряженностью 3000 э. В первом случае развитие процесса идет под влиянием чисто газодинамических факторов. В начальной стадии происходит достаточно быстрое формирование цилиндрической ударной волны с характерным для нее профилем давления и со скоростью движения по покоящемуся газу ~ 10 км/сек. Измерения и основанные на них оценки позволяют считать, что распределение параметров газа по каналу на некотором расстоянии за ударной волной определяется преимущественно его адиабатическим расширением и что течение газа в некотором интервале времени является квазистационарным. Во втором случае динамика процесса в центральной части канала по существу та же, что и в первом случае; но качественно отличается на больших радиусах. На фотографиях отчетливо видно зарождение светящегося кольца непосредственно в потоке достаточно далеко за ударной волной. Интенсивность свечения и ширина этого кольца быстро возрастают. Датчики давления одновременно фиксируют в этом же месте повышение давления, перерастающее позднее в ударную волну, а измерения плотности электрических токов — появление максимума в распределении электрического тока.

Возникающая зона повышенного давления первоначально соответствует максимуму плотности электрического тока. Однако в момент формирования новой ударной волны вследствие интенсивного торможения газа в зоне максимальных токов происходит четкое пространственное разделение зон максимальных токов и давлений. Оно не только сохраняется в поздней стадии процесса, но и увеличивается за счет движения ударной волны к центру. Вместе с тем зона интенсивно светящегося кольца, как показывают измерения, однозначно связана с максимумом плотности тока. Ширина этой зоны в среднем ~ 2 см, плотность тока в ней достигает величин 1000–1500 а/см² (рис. 2), а электропроводность, вычисленная по измеренным плотности тока, скорости, напряженности электрического и магнитного полей, равна 120–160 мо/см.

Эта величина превосходит в 10—30 раз значение электропроводности в этом месте потока при докритических магнитных полях и соответствует температуре воздуха $(5-6,5) \cdot 10^4$ °К. Попытка объяснить возникновение зоны столь высокой температуры нагревом газа вновь возникающей ударной волной неосновательна. Во-первых, как было показано выше, само возникновение ударной волны является следствием торможения зоны потока с максимальной плотностью тока в магнитном поле; во-вторых, интенсивность этой волны, оцениваемая по измеренному перепаду давлений, слишком мала, чтобы обеспечить такое повышение температуры, и, в-третьих, в процессе имеет место четкое разделение зон сжатия ударными волнами и зоны максимального свечения. Единственно разумной причиной столь интенсивного локального разогрева газа кажется выделение джоулева тепла (в нашем случае в начальной стадии процесса 1—3 дж/см³).

Анализ многочисленных экспериментов позволил не только выявить характерные особенности процесса, но и установить, с одной стороны, условия зарождения токового слоя, с другой, — устойчивость его существования как пространственного образования. В условиях нашего эксперимента характерное время процесса, т. е. время прохождения передним фронтом всей длины канала, составляло 10 мсек, время развития Т-слоя с момента его зарождения до достижения максимальной плотности тока равнялось 3—5 мсек, время же существования токового слоя достигало

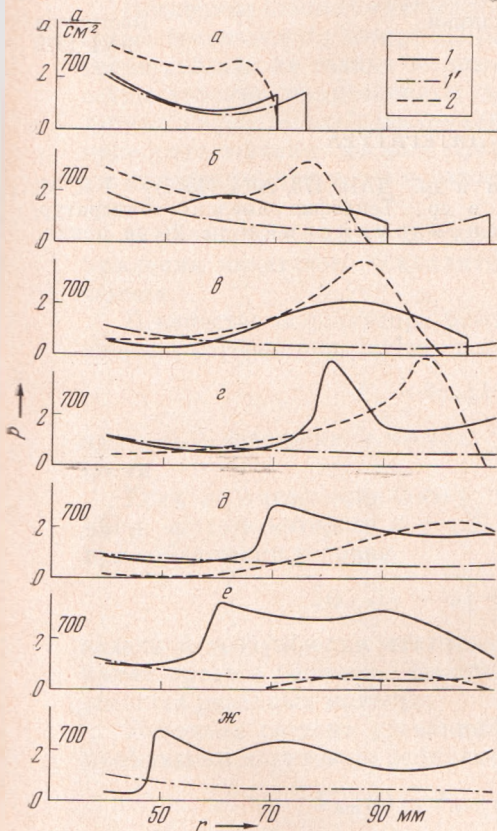


Рис. 2. Распределение параметров потока (1, 1' — давление, 2 — плотность тока) по каналу в различные моменты времени; а — 4,5 мсек; б — 8; в — 12; г — 15; д — 20; е — 27; ж — 37 мсек. 1, 2 — при $H = 3000$ э, 1' — при $H = 0$

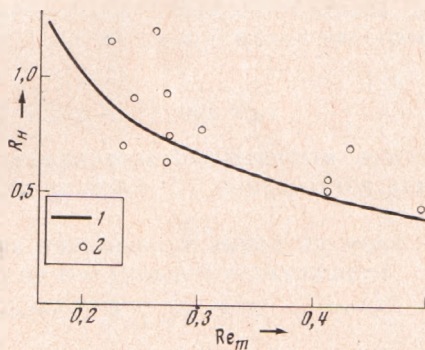


Рис. 3. Условия возникновения токового слоя. 1 — теоретический анализ (2), 2 — обработка эксперимента

20—25 мсек, причем распад его происходил, как видно из приведенных иллюстраций, преимущественно вследствие интенсивного высвечивания и уменьшения плотности тока, вызванного резким падением скорости из-за торможения слоя в магнитном поле. В ряде случаев на внешней границе слоя в момент наиболее интенсивного его торможения наблюдались характерные для Рэлей — Тейлоровской неустойчивости возмущения, величина которых возрастала до 20—30% от ширины слоя. Однако ни разу не был

зафиксирован случай распада слоя вследствие подобной неустойчивости. Наоборот, возмущения, амплитуды которых достигали указанного значения, быстро затухали (за время 2—5 мсек), и восстанавливалась форма внешней границы.

На рис. 3 в переменных $Re_m = \frac{4\pi}{c^2} \omega_0 V_0 L_0$ и $R_H = \frac{H_0^2}{4\pi P_0}$ приведены условия возникновения Т-слоя, полученные на основе обработки эксперимента. В таком виде эти условия впервые были сформулированы в (2). Сущность их состоит в том, что если исследуемый процесс характеризуется в плоскости (Re_m, R_H) точкой, лежащей выше кривой $Re_m \cdot R_H = \text{const}$, то происходит образование Т-слоя, в противном случае это явление не возникает. Эксперимент не только качественно, но и количественно подтверждает выводы (2) относительно условий образования Т-слоя.

Институт теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
8 VI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский и др., ДАН, 173, № 4 (1967). ² Л. М. Дегтярев, Л. А. Заклязьминский и др., Теплофиз. высоких температур, № 3 (1969). ³ В. А. Деревянко, Л. А. Заклязьминский и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 2 (1968).