

Член-корреспондент АН СССР А. А. САМАРСКИЙ, В. А. ДОРОДНИЦЫН,
С. П. КУРДЮМОВ, Ю. П. ПОПОВ

ОБРАЗОВАНИЕ T -СЛОЕВ В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

1. В (¹⁻⁷) описан эффект T -слоя, обнаруженный и исследованный теоретически в вычислительных экспериментах.

Явление T -слоя имеет общий характер и отмечалось в расчетах МГД-течений различных типов (сильноточные разряды в плазме, z - и θ -пинчи, течения в каналах, электродинамическое ускорение плазмы и т. д.). Существование эффекта состоит в том, что в определенных условиях при движении в магнитном поле проводящего газа в нем возникают и самоподдерживаются зоны высокой температуры. В этих зонах локализованы электрические токи и джоулев нагрев. Причиной магнитогиродинамического эффекта T -слоя (температурного токового слоя) является наличие нелинейных обратных связей между газодинамическими и электродинамическими процессами.

Существование в плазме T -слоев заметно повышает эффективность ее взаимодействия с магнитным полем. В некоторых режимах в потоке проводящего газа возможно образование нескольких T -слоев (⁸⁻¹⁰).

В (^{11, 12}) описан эксперимент по торможению плазменного ступка магнитным полем в канале рельсотрона, где наблюдается четко выраженная неоднородная структура потока, образованная чередующимися горячими и холодными слоями газа. Настоящая работа посвящена численным расчетам описанного в (^{11, 12}) процесса. Численные эксперименты показывают, что в потоке возникает система T -слоев. Совпадение результатов расчетов и экспериментов дает возможность утверждать, что в (^{11, 12}) экспериментально обнаружено явление T -слоя.

2. В эксперименте плазменный ступок инжектировался в рельсотрон, представляющий собой два параллельных электрода, подключенных к мощной батарее конденсаторов. В начальный момент пространство между электродами заполнено однородным холодным непроводящим водородом. В некоторый момент времени внешняя цепь замыкалась через плазменный ступок, вошедший в межэлектродный промежуток. В эксперименте фиксировались СФР-граммы (пространственно-временные диаграммы) движения плазменных конфигураций в межрельсовом промежутке (рис. 1), регистрировалось пространственное распределение температуры в плазме. Подробное описание установки и результатов эксперимента содержится в (^{11, 12}).

При определенных значениях начальных параметров наблюдается сложная структура, возникающая в плазме за фронтом ударной волны (рис. 1). Анализ пространственного распределения температуры и СФР-грамм показывает, что наблюдаемая структура образована чередующимися горячими и холодными слоями газа. Светящиеся слои, отделенные от фронта ударной волны темным промежутком, движутся в направлении, противоположном направлению распространения исходной ударной волны. Количество слоев, наблюдаемых в эксперименте, около десяти. Одновременно в канале рельсотрона находятся 1-2 слоя. Сложная структура наблюдается в эксперименте лишь при достаточно большом начальном напряжении

U_0 на батарее конденсаторов, превышающем пороговое значение $U_* = 400-500$ в.

3. В численном эксперименте задача о торможении плазменного сгустка магнитным полем рельсотрона рассматривалась в рамках уравнений магнитной гидродинамики в одномерном нестационарном приближении. Плазменный сгусток моделировался ударной волной, распространяющейся по покоящемуся холодному газу, заполняющему рельсотрон. Скорость движения ударного фронта, размер сгустка и параметры газа в сгустке были

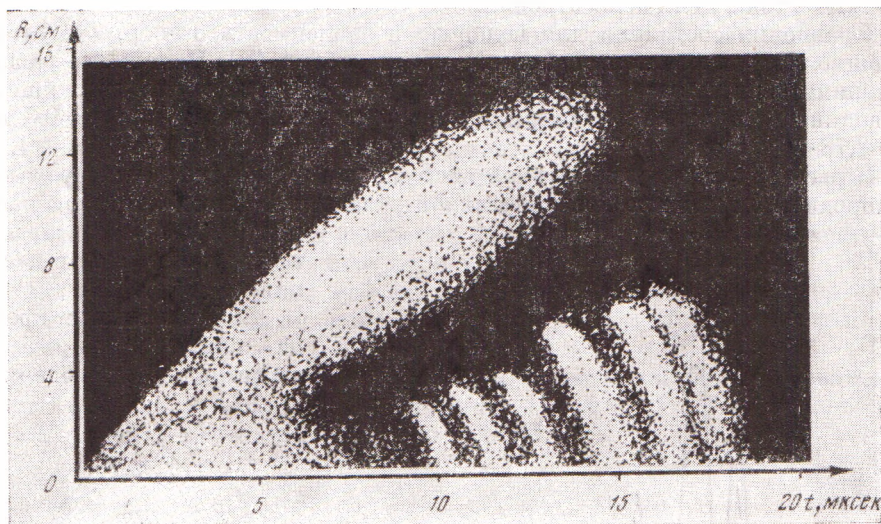


Рис. 1. Рисунок с СФР-граммы, полученной экспериментально

согласованы с экспериментальными данными. Расчет начинался с момента, когда плазменный сгусток, войдя в межэлектродное пространство, замыкает внешнюю электрическую цепь.

Система уравнений, моделирующая эти процессы, в массовых лагранжевых координатах имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial v}{\partial m}; \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial m} + F, \quad F = \frac{jH}{\rho} = -\frac{\partial}{\partial m} \frac{H^2}{8\pi};$$

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{H}{\rho} \right) = -\frac{\partial E}{\partial m}; \quad j = -\frac{\rho}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial m}; \quad j = \sigma E;$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -p \frac{\partial v}{\partial m} + Q, \quad Q = \frac{jE}{\rho}; \quad p = p(\rho, t); \quad \varepsilon = \varepsilon(\rho, T); \quad \sigma = \sigma(\rho, T);$$

здесь t — время; x — эйлерова координата; m ($dm = \rho dx$) — лагранжева массовая переменная; v — скорость плазмы, ρ — ее плотность, p — давление, ε — внутренняя энергия, T — температура; H , E — напряженности соответственно магнитного и электрического полей; j — плотность электрического тока; σ — электропроводность плазмы; F — электромагнитная сила; Q — джоулево тепло.

Система уравнений решается в области $0 \leq m < M$, $t > 0$, где M — масса плазмы в рельсотроне, отнесенная к единице площади поперечного сечения рельсотрона. На левой границе поддерживается нулевое давление

($p(0, t)=0$), что соответствует разреженному пространству за плазменным сгустком. Кроме того, $H(0, t)=0$, так как ток, текущий через рельсотрон, целиком замыкается через плазму.

Правая граница — неподвижная, достаточно далеко расположенная стенка ($v(M, t)=0$). На ней задано значение напряженности магнитного поля, определяемое из электротехнического уравнения внешней цепи:

$$H(M, t)=4\pi I(t),$$

где $I(t)$ — ток в цепи рельсотрона.

Уравнения состояния для водорода и зависимость $\sigma=\sigma(\rho, T)$, учитывающие эффект ионизации, были взяты из таблиц (13). Начальные распределения газодинамических величин отвечают ударной волне, движущейся с заданной скоростью по невозмущенному газу с параметрами $p_0=0,3$ тор, $\rho_0=2,78 \cdot 10^{-8}$ г/см³.

В расчетах сформулированная система уравнений аппроксимировалась однородной, полностью консервативной разностной схемой, которая решалась методом последовательных прогонок с итерациями (14–17).

4. Остановимся кратко на описании одного из расчетов, проведенного

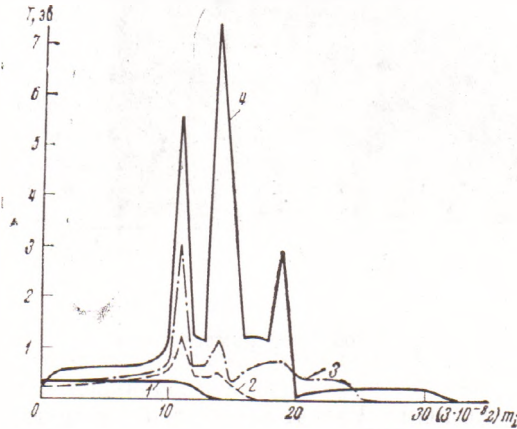


Рис. 2. Профили температуры в различные моменты времени: 1 — 0 мксек; 2 — 2 мксек; 3 — 8 мксек; 4 — 14 мксек

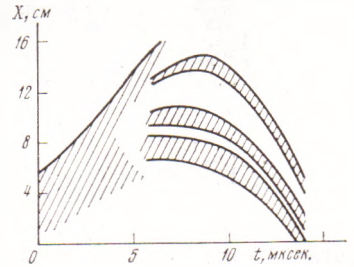


Рис. 3. Траектория движения T -слоев и фронта ударной волны

при следующих значениях параметров: $U_0=750$ в, скорость газа в «пробке» ~ 10 км/сек, длина «пробки» 6,5 см. На рис. 2 представлены на различные моменты времени профили температуры по массовой координате.

Процесс образования слоистой структуры развивается следующим образом. По мере нарастания разрядного тока и прогрева газа в «пробке» ток скинируется в ее передней части. Здесь же локализуется электромагнитная сила F и джоулев нагрев Q . Волна разрежения, двигающаяся от вакуума, охлаждая газ, делает его непроводящим, т. е. вытесняет токи и джоулев нагрев из этой области. Локализация токов и джоулева нагрева приводит на определенной стадии к возникновению T -слоя. Бурное, взрывоподобное выделение тепла в зоне T -слоя вызывает разброс газа из этой области, что усиливает первоначальную ударную волну. С ростом полного тока электромагнитная сила F (локализованная в зоне T -слоя) увеличивается, что приводит к остановке слоя и далее к его обратному движению. Образующаяся при этом волна разрежения распространяется направо, вслед за исходной ударной волной. Газ справа от T -слоя охлаждается, электрический ток и джоулев нагрев вытесняются в район фронта волны. Таким образом формируется новый T -слой. Спустя некоторое время в результате аналогичных процессов возникает еще один слой. Количество

T -слоев в описанном расчете равно трем. При этом в канале одновременно находятся 1–2 слоя.

На рис. 3 изображены траектории движения образовавшихся T -слоев и фронта ударной волны в фазовой плоскости (x, t) . Сопоставление этого графика с СФР-граммой указывает на большое число общих черт. В расчете (см. рис. 3) фронт ударной волны движется, замедляясь, со скоростью 12–14 км/сек, что хорошо соответствует экспериментальной картине. «Полосатый» участок течения на СФР-грамме легко отождествляется с T -слоями, разделенными промежутками холодного газа.

Характерная «крюкообразная» форма полос на СФР-грамме соответствует форме траекторий слоев, полученных в расчете. Начальная часть траекторий до момента остановки слоя в эксперименте не фиксируется, поскольку температура в T -слое еще невелика. Экспериментальные и расчетные значения характерной скорости и ширины полос близки.

В расчетах, так же как и в эксперименте, варьировалось начальное напряжение U_0 на емкости во внешней цепи. При увеличении U_0 температуры и их скорость увеличиваются, что также соответствует экспериментальным данным. При снижении U_0 ниже критического значения U_* ($400 \text{ в} < U_0 < 450 \text{ в}$) слоистая структура исчезает.

Таким образом, расчеты подтверждают пороговость образования слоистой структуры, причем значения порогового напряжения в расчете и эксперименте совпадают.

Авторы благодарны В. Д. Письменному и сотрудникам возглавляемой им лаборатории за полезные обсуждения, а также Г. В. Даниловой и Л. С. Царевой за проведение расчетов на ЭВМ.

Институт прикладной математики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
28 XII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, Л. А. Заключенский, Препринт. Эффект T -слоя в магнитной гидродинамике, М., 1969. ² А. Н. Тихонов и др., ДАН, т. 173, № 4 (1967). ³ П. П. Волосевич, В. С. Соколов, Магнитная гидродинамика, т. 1, 1967, стр. 43. ⁴ П. П. Волосевич и др., Журн. вычислит. матем. и матем. физ., т. 10, № 6, 1447 (1970). ⁵ П. П. Волосевич и др., Сборн докл. на IX Международн. конфер. по явлениям в ионизированных газах, Бухарест, 1969, стр. 394. ⁶ П. П. Волосевич и др., Мех. жидкости и газа, № 1 (1968). ⁷ Л. М. Дегтярев и др., Теплофиз. высоких температур, т. 7, № 3 (1969). ⁸ С. А. Беляев, Д. А. Гольдина и др., Расчет нестационарного ускорения плазмы в одномерном приближении, М., 1969, Деп. № 1790–70. ⁹ С. А. Беляев и др., Там же, 1970, стр. 1. ¹⁰ А. А. Самарский и др., ДАН, т. 206, № 2, 307 (1972). ¹¹ А. И. Захаров, С. П. Курдюмов и др., ДАН, т. 212, № 5 (1973). ¹² А. I. Zakharov, V. V. Klavdiev et al., Phys. Letters, v. 43A, № 2 (1973). ¹³ Н. Н. Калинкин, Л. В. Кузьмина и др., Таблицы термодинамических функций и транспортн. коэффициентов плазмы, Л., 1972. ¹⁴ В. Я. Гольдин и др., Исследование задач магнитной радиационной газодинамики численными методами на ЭВМ, М., Инст. прикл. матем., препринт № 36, 1971. ¹⁵ Ю. П. Попов, А. А. Самарский, Журн. вычислит. матем. и матем. физ., т. 10, № 4 (1970). ¹⁶ А. А. Самарский и др., Там же, т. 8, № 5 (1968). ¹⁷ Ю. П. Попов, Там же, т. 11, № 2 (1971).