

ОБРАЗОВАНИЕ T -СЛОЕВ В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ *

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

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.). Существо 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 магнитогидродинамического 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 сгустка 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 сгусток инжестировался 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 сгусток, вошедший в

* ДАН СССР, 1974, т. 216, № 6, с. 1254-1257.

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 находятс 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 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 - эйлера 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.

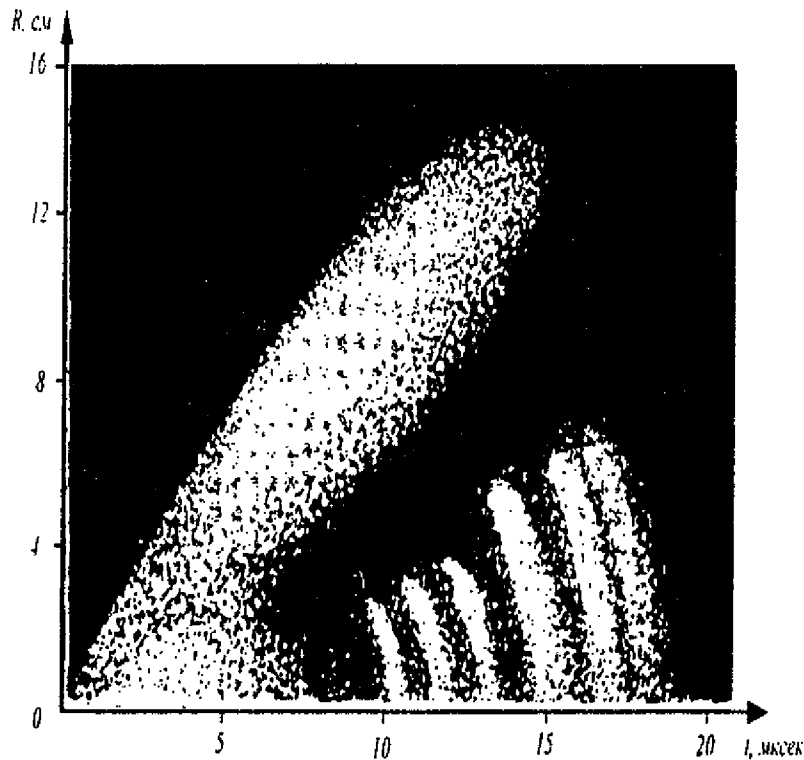


Рис. 1. Рисунок с СФР-граммы, полученной экспериментально

Система уравнений решается в области $0 < m < M, t > 0$, 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, $\rho_0 = 2,78 \cdot 10^{-3}$ 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 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.

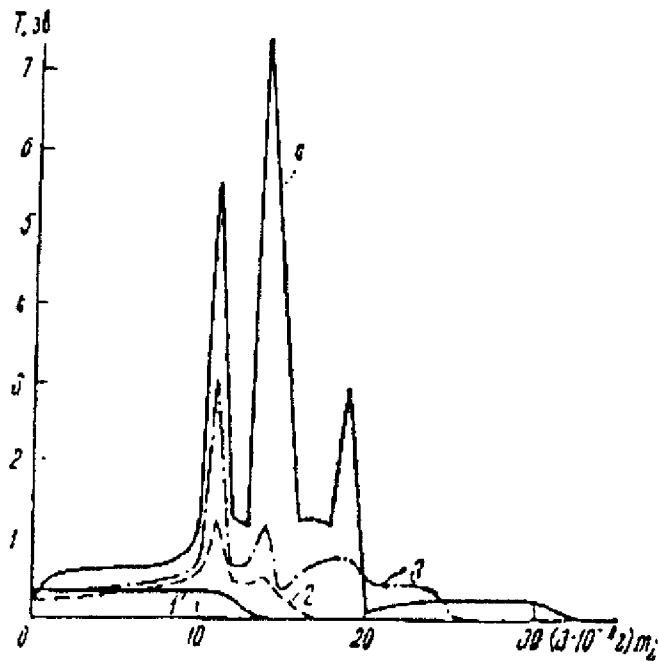


Рис. 2. Профили температуры в различные моменты времени:
1 - 0 мксек; 2 - 2 мксек; 3 - 8 мксек; 4 - 14 мксек

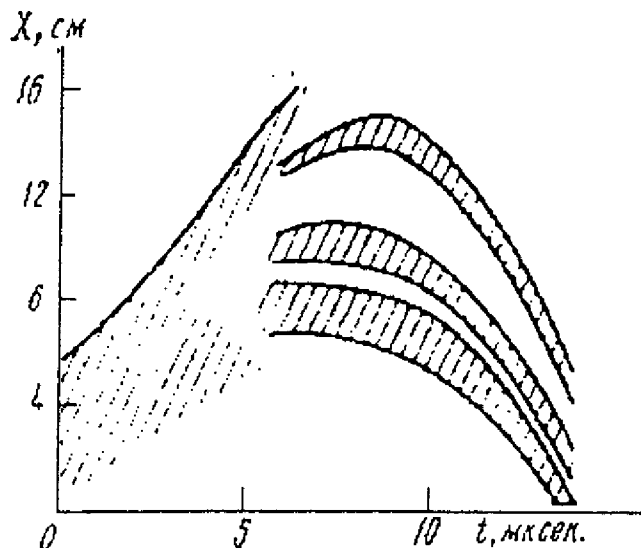


Рис. 3. Траектории движения T-слоев и фронта ударной волны

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 Т-слоя. Бурное, взрывоподобное выделение тепла в зоне Т-слоя вызывает разброс газа из этой области, что усиливает первоначальную ударную волну. С ростом полного тока электромагнитная сила F (локализованная в зоне Т-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 Т-слоя охлаждается, электрический ток и джоулев нагрев вытесняются в район фронта волны. Таким образом формируется новый Т-слой. Спустя некоторое время в результате аналогичных процессов возникает еще один слой. Количество Т-слоев в описанном расчете равно трем. При этом в канале одновременно находятся 1-2 слоя. На рис.3 изображены траектории движения образовавшихся Т-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 Т-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 Т-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 температура в Т-слоях и их скорость увеличиваются, что также соответствует экспериментальным данным. При снижении U_0 ниже критического значения U_* ($400\text{В} < U_* < 450\text{В}$) 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.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, Л.А. Заклязьминский, Препринт. Эффект Т-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. Л.И. Захаров, С.П. Курдюмов и др., ДАН, т. 212, № 5 (1973).
12. А.И. Zakharov, V.V. Klavdiev et al., Phys. Letters, v. 43A, №2 (1973).
13. Я.Я. Калиткин, 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).