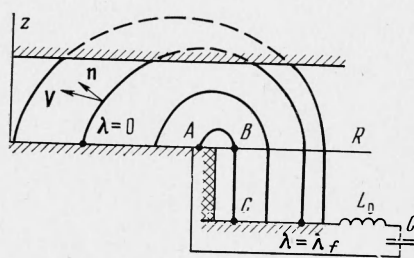


СОГЛАСОВАНИЕ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА С ДВИЖЕНИЕМ ОБОЛОЧКИ В НЕЦИЛИНДРИЧЕСКОМ Z-ПИНЧЕ

В. В. Вихрев

(Москва)

Проведены модельные расчеты двумерного движения оболочки в нецилиндрическом Z-пинче по схеме, предложенной в работах [1,2]. В этой модели двумерного «snow — plough» в каждый момент времени определяется конфигурация оболочки, которая считается бесконечно тонкой. При хорошем совпадении с имеющимися экспериментальными данными расчеты позволили предсказать размеры камеры и индуктивность разрядного контура, необходимые для эффективного использования энергии конденсаторной батареи.



Фиг. 1

$$M(t) = \int_0^{\lambda_f} \mu d\lambda$$

По модели «snow — plough» газ полностью захватывается токовой оболочкой и тем самым увеличивает ее массу. Если считать оболочку достаточно тонкой, то

$$d\mu / dt = 2\pi R \rho (\mathbf{n} \cdot \mathbf{V}) \quad (1.1)$$

где ρ — первоначальная плотность газа, $R(\lambda, t)$ — радиус оболочки, $\mathbf{V}(\lambda, t)$ — скорость оболочки, $\mathbf{n}(\lambda, t)$ — нормаль к токовой оболочке, направленная в сторону плазмы.

Уравнение, описывающее движение элемента массы, имеет вид

$$\frac{d\mu \mathbf{V}}{dt} = \frac{I^2}{c^2 r t} \mathbf{n} \quad (1.2)$$

Величина тока $I(t)$ определяется уравнением контура

$$U_0 - \frac{1}{c} \int_0^t I d\lambda = \frac{dLI}{c t} \quad (1.3)$$

Здесь U_0 — начальное напряжение, C — емкость конденсаторной батареи, $L = L_0 + L_1$, где L_0 — начальная индуктивность, L_1 — переменная индуктивность оболочки.

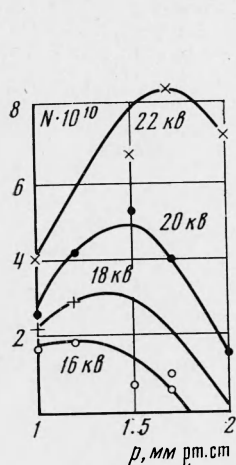
2. Расчетная схема. Полученные уравнения решались численно на ЭВМ. Начальная конфигурация оболочки задавалась в виде полуокружности AB и прямого участка BC (фиг. 1). Дуга AB разбивалась равномерно не более чем на 200 расчетных участков. Увеличение числа расчетных точек или неравномерное их распределение на дуге AB приводит к появлению неустойчивости в расчетной схеме.

Удар оболочки о верхнюю крышку разрядной камеры учитывался тем, что в уравнении контура не принималась во внимание индуктивность оболочки, соответствующая пространству выше крышки камеры.

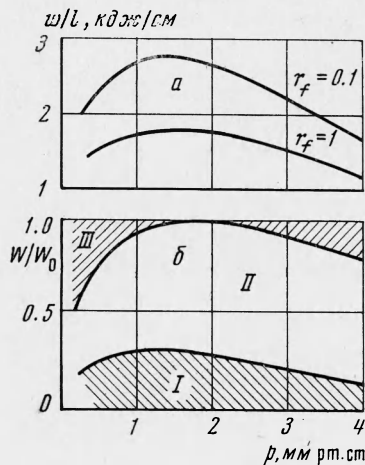
3. Критерий согласованности. При экспериментальном изучении Z-пинчей простым критерием хорошей работы установки является количество нейтронов, образующихся за разряд в результате термоядерной реакции. Оно зависит одновременно от таких величин, как плотность, температура, объем и время жизни плазмы. На фиг. 2 приведена зависимость нейтронного выхода от напряжения на батарее и давления дей-

терия в камере, полученная на установке «нецилиндрический Z-пинч» [3]. Характерно, что с повышением напряжения режим с наибольшим нейтронным выходом смещается в сторону больших давлений. Такая зависимость является следствием условий согласования времени разряда батареи с временем движения токовой оболочки и указывает на существенное значение этих условий.

В модели, используемой здесь, трудно определить температуру и конечный радиус пинча, так как структура оболочки не рассматривается. Достаточно хорошим критерием согласованности внешнего контура с движением токовой оболочки может служить кинетическая энергия, приходящаяся на единицу высоты пинча в зоне фокуса при сжатии его до некоторого достаточно малого «конечного» радиуса r_f (будем обозначать эту энергию w/l). Далее в момент максимального сжатия эта кинетическая энергия переходит в тепловую, и поэтому величина w/l характеризует NT , где N — количество частиц на единицу высоты пинча, T — температура плазмы.



Фиг. 2



Фиг. 3

Поскольку в рамках данной модели конечный радиус r_f определить нельзя, то результаты расчета представлены для двух значений r_f , отличающихся в 10 раз. Численные расчеты показали, что нахождение оптимума слабо зависит от r_f , так что его точное значение несущественно.

4. Влияние давления газа на согласованность. На фиг. 3,а представлены расчетные зависимости энергии на единицу высоты пинча w/l от начального давления p дейтерия в камере для типичного режима установки «нецилиндрический Z-пинч» [3] ($U_0 = 18$ кВ, $W = 93$ кдж, $L_0 = 30$ нГн).

Видно, что для исследуемого варианта камеры (радиус анода 33 см) установка работает в согласованном режиме (т. е. w/l максимальна) при $p = 1.5$ мм рт. ст. D_2 . Этот результат не зависит от выбора r_f . На установке «нецилиндрический Z-пинч» наибольший нейтронный выход при данных условиях наблюдался при давлении 1.3 мм рт. ст. D_2 (фиг. 2).

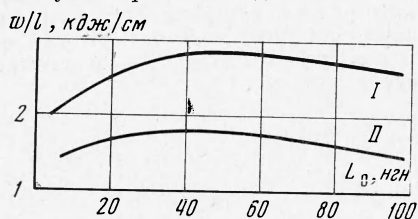
На фиг. 3,б показано соотношение между отдельными видами энергии в момент кумуляции на оси (I — магнитная энергия, II — энергия в плазме, III — энергия в конденсаторной батарее). В согласованном режиме энергия, оставшаяся в конденсаторной батарее, не превышает 1% первоначально запасенной. Это означает, что при варьировании p максимум величины w/l достигается при наиболее полном использовании энергии конденсаторной батареей.

5. Влияние индуктивности внешнего контура на согласованность. Зависимость энергии на единицу высоты пинча w/l от индуктивности внешнего контура L_0 для типичного режима установки ($C = 576$ мкФ, $U_0 = 18$ кВ, $R = 33$ см, $p = 1$ мм рт. ст.) показана на фиг. 4 (I для $r_f = 0.1$ см, II для $r_f = 1$ см). Наличие максимума объясняется тем, что при очень большой индуктивности значительная часть энергии остается во внешнем контуре, а при слишком малой индуктивности L_0 много энергии выделяется в самом начале разряда, и оболочка «ослабевает» к моменту достижения оси камеры. То значение L_0 , при котором величина w/l максимальна, связано с индуктивностью оболочки в сжатом состоянии L_f соотношением

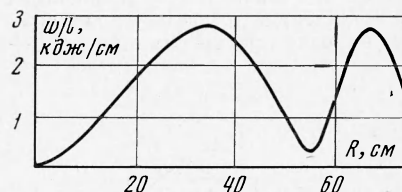
$$L_0 \approx \frac{1}{2} L_f$$

Так, например, на фиг. 4 (кривая I) максимум величины w/l получается при $L_0 = 50$ нгн, а индуктивность оболочки в момент сжатия при $r_f = 0.1$ см составляет 108 нгн. При сжатии оболочки до $r_f = 1$ см индуктивность ее равна 90 нгн, и согласованный режим наблюдается при $L_0 = 40$ нгн (кривая II на фиг. 4).

Вследствие того, что в районе максимума зависимость энергии на единицу высоты пинча w/l от L_0 и p слабая, оказывается практически выгоднее работать при несколько меньших индуктивностях контура L_0 , чем оптимальное, что уменьшает напряжение на камере в момент сжатия, и при меньших давлениях p , что дает несколько большую скорость сжатия оболочки, чем в согласованном режиме.



Фиг. 4



Фиг. 5

6. Влияние размеров камеры на согласованность. Основным геометрическим параметром, влияющим на согласованность системы, является радиус внутреннего электрода R . Зависимость величины w/l от R при $C = 576$ мкф, $U_0 = 18$ кВ и $p = 1$ мм рт. ст. показана на фиг. 5. Видно, что при заданных параметрах разрядного контура и при заданном давлении p установка работает в согласованном режиме при радиусе анода 30–40 см. Второй максимум на кривой w/l соответствует случаю, когда максимальное сжатие происходит во втором полупериоде разрядного тока. Радиус анода R в этом случае должен быть ~ 65 см. Однако из-за уменьшения скорости сжатия на втором максимуме обычно не работают.

Для камеры с высотой изолятора 12 см и расстоянием между анодом и крышкой камеры 14 см согласованный режим в дейтерии, как показывают расчеты, осуществляется при радиусе камеры

$$R = (0.088 CU_0 p^{-1/2})^{0.53} \quad (6.1)$$

где R выражено в см, C в мкф, U_0 в кВ, p в мм рт. ст. Изменение высоты изолятора и расстояния между электродами слабо влияет на условие согласованности. Из (6.1) следует, что в установке с энергией батареи 10 Мдж и напряжением 50 кВ для согласования при давлении 1 мм рт. ст. D_2 необходимо, чтобы радиус анода камеры был равен ~ 2.5 м.

В заключение автор благодарит Н. В. Филиппова и В. В. Прута за обсуждение и оказанную помощь.

Поступила 27 VI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Basque G., Jolas A., Watteau J. P. Comparison of two-dimensional snowplough with experiment. Phys. Fluids, 1968, vol. 11, No. 6.
2. Patou C., Simonnet A., Watteau J. P. Dynamique et émission neutronique d'une décharge électrique non cylindrique focalisante. J. Phys., 1968, t. 29, No. 11, 12.
3. Агафонов В. И., Голуб Г. В., Голубчиков Л. Г., Дьяченко В. Ф., Иванов В. Д., Имшенник В. С., Колесников Ю., Свирский Э. Б., Филиппов Н. В., Филиппова Т. И. Исследование нецилиндрического Z-пинча при токах свыше 1 Ма. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res., vol. 2, Vienna, 1969, pp. 24–37.