

**МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
С ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВЫВОДОМ ЭНЕРГИИ**

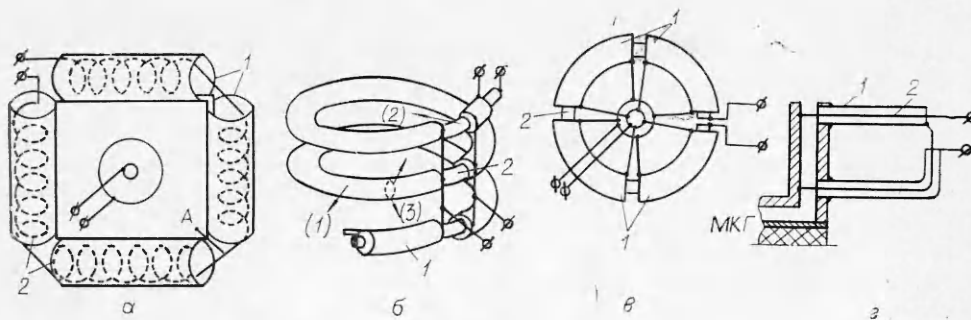
*В. Ф. Бухаров, В. А. Васюков, В. Е. Гурин, Д. И. Зенков,  
А. С. Кравченко, Р. З. Людаев, А. И. Павловский,  
Ю. И. Плющев, Л. Н. Пляшкевич, А. М. Шувалов  
(Москва)*

Магнитокумулятивные генераторы тока перспективны в качестве мощных импульсных источников электрической энергии [1—3]. При непосредственном включении нагрузки в цепь магнитокумулятивного генератора (МКГ) его эффективная работа возможна лишь при наложении ограничений на параметры нагрузки. Во многих областях применений индуктивность и сопротивление нагрузки значительно превышают конечную индуктивность и сопротивление МКГ, параметры нагрузки меняются при работе генератора, требуемое время ввода энергии в нагрузку отличается от времени работы генератора.

Одним из способов согласования параметров МКГ и нагрузки является применение повышающего трансформатора, при этом нагрузка подключается ко вторичной обмотке, а МКГ — к первичной. Об осуществлении трансформаторного способа отвода энергии от МКГ сообщалось в 1965 г. [2]. В последующих публикациях [4—6] описан ряд конструкций МКГ с трансформатором, рассмотрены в рамках электротехнической модели вопросы их согласования с омическими и индуктивными нагрузками, оптимизации их параметров. Для ряда физических исследований представляет интерес вопрос о включении емкостных элементов в цепи нагрузки МКГ [7]. Применение трансформатора в сочетании с различными коммутирующими элементами позволяет в некоторых пределах регулировать время ввода энергии в нагрузку. На основе трансформаторного соединения могут быть образованы каскадные системы МКГ с большим коэффициентом усиления энергии. В данной работе приводятся описания ряда МКГ с трансформаторными узлами и экспериментальные результаты исследования их работы, а также составленных из этих генераторов каскадных систем.

Сложная геометрия трансформаторов затрудняет расчет трансформаторных МКГ, хорошие результаты при инженерных расчетах дает электротехническая модель МКГ. Численное решение электротехнических уравнений позволяет находить оптимальные значения индуктивности и сопротивления нагрузки. При отклонении нагрузки от оптимального значения выходная энергия снижается, допустимые пределы этого снижения определяют область согласования нагрузки с МКГ. Ширина области согласования особенно существенно существует при работе на нагрузки с переменными параметрами, с повышением коэффициента трансформации она увеличивается. В работе [7] предложено также применение МКГ как зарядного устройства быстрых емкостных накопителей. Характер работы МКГ на емкость отличается возможностью возникновения токовых колебаний. При питании емкости от МКГ через трансформатор, даже при наличии высокочастотных колебаний во вторичной цепи, внутри МКГ токовые колебания не возникают.

Для регулирования формы токового импульса в нагрузке разработаны различные варианты схемы энергопитания на основе трансформаторных МКГ с использованием средств коммутации. Так как во вторичной цепи ток меньше, чем в МКГ, это облегчает применение известной схемы с разрывом токового контура с помощью взрыва или взрывающегося



Ф и г. 1

проводника [1]. В некоторых пределах токовый фронт в нагрузке можно сократить с использованием холостого хода трансформатора на начальных этапах работы МКГ [8]. Если трансформатор функционирует и по окончании работы МКГ, можно использовать в нагрузке дополнительно часть энергии, остающейся в контуре МКГ к концу его работы и теряемой при разрушении трансформатора.

Если требуемое время функционирования трансформатора порядка времени работы МКГ, он может быть размещен непосредственно на МКГ, что позволяет повысить коэффициент связи  $k$  и снизить требования к линии передачи энергии к нагрузке. Поскольку в этом случае трансформатор уничтожается, определяющими являются простота и дешевизна конструкции, механическая прочность конструкции может быть снижена.

Из-за больших магнитных полей применимы только безжелезные конструкции, обеспечивающие максимальную связь. Габариты трансформаторов определяются в основном требуемой индуктивностью первичной обмотки  $L_{1T}$  при обеспечении необходимой добротности обмоток. Чаще используются одновитковые первичные обмотки. Возможна также первичная обмотка в виде нескольких индуктивно не взаимодействующих между собой контуров, охваченных общим вторичным витком.

На фиг. 1 представлены некоторые конструктивные схемы трансформаторов. Цилиндрический трансформатор удобен для подсоединения к шинным МКГ [1], его параметры определяются известными зависимостями соленоидов. При работе МКГ сопротивление обмоток будет меняться из-за диффузии магнитного поля в проводники трансформатора. Для уменьшения сопротивления вторичная цепь выполняется в несколько заходов. Смещения проводников при работе МКГ сводятся к радиальному разлету первичной обмотки, сжатию вторичной и осевым смещениям торцов. Верхняя граница этих смещений пропорциональна  $\int (\int H^2 dt) dt$ , где  $H$  — напряженность магнитного поля на поверхности проводника, и обратно пропорциональна массе проводника, приходящейся на единицу площади его поверхности.

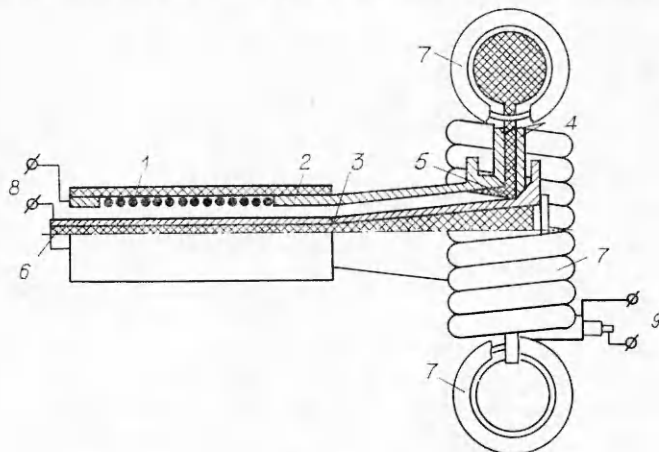
Для подсоединения таких трансформаторов к коаксиальным или спиральным МКГ удобна конфигурация (фиг. 1, а), где к двум токоведущим пластинам подсоединяются по периметру первичные обмотки 1 трансформаторов. Вторичные обмотки 2 трансформаторов могут подводиться к нагрузке от каждого трансформатора независимо либо как на фиг. 1, а, когда вторичная обмотка общая. Целесообразно в этом случае иметь общую точку обмоток А, что позволяет примерно вдвое снизить требования по напряжению к изоляции между обмотками, но при этом при заземленной нагрузке между корпусом МКГ и землей будет напряжение, равное примерно половине выходного. Первичная обмотка трансформатора может быть выполнена в виде размещенного на МКГ тороида прямоугольного или круглого сечения, вторичная обмотка в виде тороидального соленоида размещается внутри первичной.

Схема кабельного трансформатора [9] в применении к МКГ показана на фиг. 1, б. Нагрузка может также подсоединяться к обоим концам жилы кабеля, что снижает требования к изоляции кабеля. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки, определяемая индуктивностью кабеля, может быть уменьшена намоткой параллельных кабелей, что снижает ее сопротивление и величину тока, приходящегося на кабель. Смещение (1) вызывается радиальным растяжением витков, смещение (2) участков жилы кабеля, не имеющих оплетки, определяется разностью полей в токопроводе и внутри трансформатора, смещение (3) оплетки кабеля определяется текущим по нему током. В кабельном трансформаторе в виде цилиндрического соленоида необходимо учитывать и торцевые смещения. Может быть образован также и тороидальный кабельный соленоид либо вариант по схеме фиг. 1, в. Здесь первичная обмотка 1 представляет собой несколько секторов витка оплетки кабеля, подсоединяемых к токоведущим фланцам МКГ, охватываемых общим витком жилы кабеля. Коэффициент трансформации при этом примерно равен числу секторов. Вторичная обмотка 2 такого трансформатора может иметь несколько витков, параллельных кабелей. Достоинством трансформатора является меньший расход кабеля.

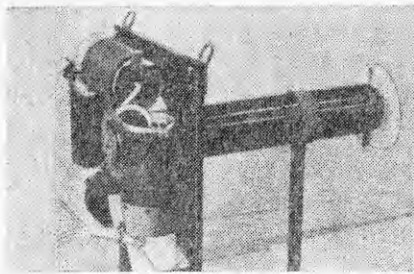
В 2-витковом кабельном трансформаторе (фиг. 1, г) можно использовать возможность подключения нагрузки к разрыву оплетки в любом месте кабеля. Поэтому трансформатору можно придать удлиненную форму, тем самым увеличивая  $L_{1T}$ , габариты трансформатора и частично используя его в функции линии передачи энергии к нагрузке.

Разработан набор конструкций МКГ, состоящих из спирального генератора в комбинации с коаксиальным конусным МКГ [3], которые снабжены трансформаторными узлами. Конструктивная схема такого генератора представлена на фиг. 2. Генератор выполнен в виде двух отдельных блоков (блок МКГ и трансформаторный узел), соединяемых с обеспечением надежного контакта. Многозаходная спираль 1 намотана изолированным медным проводом, снаружи укреплена бетонной оболочкой. Коаксиальный участок 2 имеет конусное уширение с углом, близким к углу разлета стенок медной центральной трубы 3 под действием детонации заряда ВВ 6. МКГ присоединяется к трансформаторному блоку через две токоведущие квадратные пластины 4, разделенные изолятором 5, к каждой стороне которых присоединен трансформатор 7, намотанный кабелем. Начальная энергия подается на вход 8 генератора, нагрузка подключается к выходу 9. Генератор смонтирован на металлической подставке. Общий КПД этих генераторов  $\sim 8\%$ .

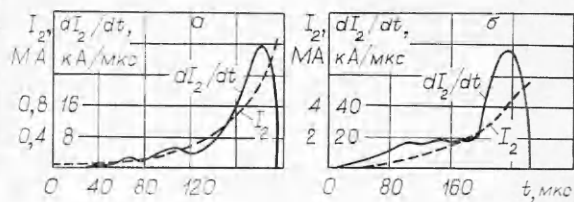
На фиг. 3 представлен внешний вид генератора К-80. Характеристики спирали: многозаходная, внутренний диаметр 80 мм, имеет 6 секций длиной по 80 мм, шаги секций 5, 10, 20, 40, 80 и 200 мм, намотана проводом



Ф и г. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

диаметром 2,5 мм. Коаксиальная часть длиной 260 мм, медная центральная труба с наружным диаметром 23 мм и толщиной стенки 2 мм имеет конусное уширение с углом  $4^\circ$ , заряд ВВ 0,8 кг. Трансформаторный узел состоит из 4 цилиндрических трансформаторов с 32-витковой вторичной обмоткой, расположенной внутри первичного витка. Характеристики этого генератора приведены в таблице, где  $L_0$  — начальная индуктивность МКГ,  $N$  — количество витков вторичной обмотки,  $L_{2T}$  — индуктивность вторичной обмотки,  $L_H$  — индуктивность нагрузки,  $L_{\text{эф}}$  — конечное значение индуктивности МКГ (индекс э показывает эффективное значение,  $f$  — конечное значение соответствующей величины),  $T$  — время работы МКГ,  $I_{10}$  — начальный ток МКГ,  $I_{1f}$ ,  $I_{2f}$  — конечные значения токов в первичном и вторичном контурах,  $U$  — выходное напряжение,  $P$  — пиковая мощность,  $W_0$  — начальная энергия МКГ,  $W_f$  — конечное значение магнитной энергии в контурах,  $W_{mf}$  — энергия в индуктивной нагрузке,  $\Phi_{\text{эф}}$  — конечное значение коэффициента сохранения магнитного потока,  $\psi_f = W_{mf}/W_f$ ,  $w_{mf} = W_{mf}/W_0$ . Генератор К-80 питается от конденсаторов. Имеется также вариант этого генератора с кабельным трансформатором с аналогичными характеристиками.

Генератор К-160 имеет спираль с внутренним диаметром 160 мм, намотанную изолированным медным проводом с диаметром жилы 4 мм, которая состоит из двух секций длиной по 320 мм с двумя витками каждая, коаксиальный участок длиной 640 мм имеет конусное уширение с углом  $7^\circ$ . Центральная труба с наружным диаметром цилиндрической части 80 мм и толщиной стенок 4 мм содержит 10 кг ВВ. Общий вес генератора с подставкой 450 кг.

Параметры генератора и экспериментальные результаты приведены в таблице.

Экспериментальная кривая  $I_2$  и  $dI_2/dt$  для генератора К-160 приведена на фиг. 4, а. На фиг. 5, а представлено изменение магнитного поля в полости коаксиала на разных радиусах, не превышающее 60 МА/м во всех генераторах. На фиг. 5, б представлена зависимость экспериментальных значений  $W_h$  (значение  $W$  в момент окончания работы спирали), а также  $W_{mf}$  от  $W_0$ . Расчетные зависимости  $L_{\text{эф}}$ ,  $\psi_f$  при  $R_H = 0$  ( $R_H$  — сопротив-

Тип МКГ	К-80	К-160	К-320	Тип МКГ	К-80	К-160	К-320
$L_0$ , мкГ	20	1,4	1,2	$U$ , кВ	75	110	100
$N$	32	16	8	$P$ , ТВт	0,02	0,12	0,5
$L_{1T}$ , нГ	14	25	50	$W_0$ , кДж	2,5	200	1800
$L_{2T}$ , мкГ	14,5	6,8	3	$W_f$ , МДж	0,5	5,1	31
$L_H$ , мкГ	6,5	3	1,5	$W_{mf}$ , МДж	0,25	3	20
$L_{\text{эф}}$ , нГ	5	10	16	$k$	0,95	0,96	0,97
$T$ , мкс	100	200	250	$\Phi_{\text{эф}}$	0,22	0,5	0,55
$I_{10}$ , кА	16	500	1700	$\psi_f$	0,5	0,58	0,65
$I_{1f}$ , МА	14	32	64	$w_{mf}$	100	20	11
$I_{2f}$ , МА	0,26	1,4	5,5				



Ф и г. 5

ление нагрузки) от  $L_n$  представлены на фиг. 5, в, здесь же и зависимость  $W_{gf}$  от  $R_n$  ( $L_n = 0, I_{20} = 0$ ). Область согласования по  $L_n$ , определяемая для данного генератора величиной  $L_{\text{эф}}$  и  $\psi_f$ , составляет 2 — 3,5 мкГ, ширина области согласования по  $R_n$  от 0,04 до 0,1 Ом. Изменение внутреннего сопротивления вторичной обмотки  $R_{2T}$ , обусловленное изменением эквивалентной частоты во время работы МКГ, колеблющейся на уровне 5—10 кГц, показано на фиг. 5, г. Здесь же дано изменение  $R_{2T}$  в зависимости от изменения  $\alpha = L_n/L_{2T}$ , измеренное до опыта на частоте 10 кГц. Штриховая линия показывает значение, принимаемое в расчетах постоянным.

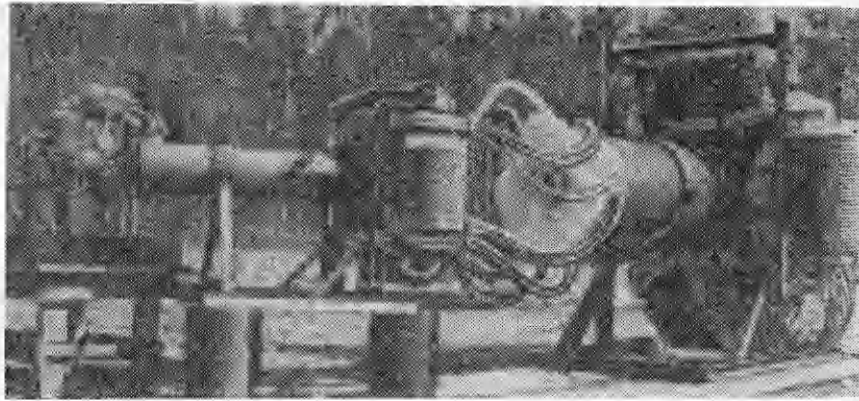
К этому генератору разработаны также трансформаторные блоки с 4- и 8-витковой вторичной обмоткой (имеющие соответственно большее число параллельных кабелей), с 32- и 64-витковой, полученные последовательным соединением 16-витковых трансформаторов. При этом с увеличением вдвое числа витков  $I_{2f}$  уменьшается примерно вдвое,  $U$  увеличивается вдвое, согласованные значения  $L_n$  и  $R_n^*$  увеличиваются в 4 раза. Для  $N = 64$   $U \sim 400$  кВ,  $L_n$  до 100 мкГ,  $R_n$  порядка нескольких ом.

Генератор может использовать начальную энергию конденсаторной батареи или другого МКГ. Разработан вариант блока МКГ с повышенным коэффициентом усиления энергии с питанием от конденсаторов. Его спираль имеет 6 секций по 160 мм длиной (16, 8, 4, 2, 1 и 0,5 витка) с  $L_0 = 35$  мкГ. При  $W_0 = 20$  кДж генератор имеет те же конечные параметры, при этом  $w_{mf} = 150$ . Трансформаторные узлы и блоки МКГ всех вариантов взаимозаменяемы.

Внешний вид генератора К-320 представлен на фиг. 6. Спираль этого генератора намотана изолированным проводом с диаметром по меди 9 мм. Первая секция длиной 640 мм имеет два витка, вторая длиной 320 мм имеет 0,5 витка. Длина коаксиальной части 960 мм. Наружный диаметр медной центральной трубы 160 мм, толщина стенки 8 мм, угол конуса 7°. Трансформатор с  $N = 8$  намотан тем же кабелем, что и в К-160, на каркасе диаметром 440 мм и длиной 750 мм. Питается генератор от другого МКГ. Масса генератора с подставкой 2200 кг, заряд ВВ 59 кг. На фиг. 4, 6 представлены экспериментальные кривые  $I_2$  и  $dI_2/dt$  для этого генератора.

Преимущество трансформаторных генераторов заключается в более широком диапазоне параметров возможных нагрузок, что повышает универсальность МКГ. Это облегчает работу МКГ и на нагрузки с переменными параметрами, например, в плазменных исследованиях [10].

Описанные генераторы могут быть использованы и в других традиционных областях применения МКГ, например для питания соленоида начального поля в генераторах МК-1 и т. п. Генератор К-160, включенный по схеме с использованием холостого хода, применялся для питания безжелезных бетатронов [11], обеспечивая в ненапряженном режиме при  $\tau = 100$  мкс энергию  $\sim 1$  МДж.



Фиг. 6

С помощью трансформаторной связи можно формировать каскадные системы МКГ, в которых каждый предыдущий генератор служит источником начальной энергии для последующего. Контур МКГ можно рассматривать в основном как индуктивную нагрузку и соответственно выбрать параметры трансформатора предыдущего генератора. Трансформатор может при этом работать с использованием холостого хода либо даже в режиме захвата магнитного потока, поскольку сокращение токового фронта начального тока улучшает работу спиральных генераторов.

Если объединить в каскад  $n$  генераторов с одинаковым  $w_{mf}$ , то коэффициент усиления энергии всем каскадом будет  $w_{mf}^n$ . Поскольку с помощью трансформатора в нагрузку может быть получен магнитный поток, превышающий начальный, это позволяет соединять в каскад генераторы с увеличивающейся начальной индуктивностью, увеличивающимися габаритами. С увеличением размеров единичного МКГ растет его выходная энергия. Такой принцип построения каскадной системы позволяет также, поскольку общий КПД системы определяется в основном генератором последней ступени каскада, предыдущие генераторы рассчитывать на меньший КПД, но на более высокую величину  $w_{mf}$ . Каскадная система, составленная из генераторов К-80, К-160 и К-320, показана на фиг. 6. Система потребляет  $W_0 = 2$  кДж и имеет  $w_{mf} = 10^4$ . В системе использован генератор К-160 с 8-витковым трансформаторным узлом и блоком МКГ с 6-секционной спиралью, у которой отсутствовала первая секция,  $L_0 = 6,5$  мкГ.

При продолжении каскадной системы в сторону малых энергий начиная с некоторого момента дальнейшее уменьшение габаритов МКГ нецелесообразно, поскольку спиральные генераторы в недозгруженных режимах имеют более высокое значение  $w_{mf}$ . Примером может служить каскадная система [12], составленная из шести одинаковых генераторов с диаметром спирали 30 мм, объединенных тороидальными кабельными трансформаторами, которая при использовании 0,2 Дж энергии постоянных магнитов дает в нагрузку  $\sim 1,5$  кДж. При питании от этой системы каскада (см. фиг. 6) общий коэффициент усиления энергии всего устройства составит  $\sim 10^8$ . В свою очередь, генератор К-320 может служить источником начальной энергии для еще более высокоэнергетического МКГ. В настоящее время благодаря трансформаторному соединению не составляет трудностей объединить в одну каскадную систему генераторы от минимально до максимально возможных для МКГ диапазонов энергий. Очевидно, что минимальный уровень каскадной системы определяется конкурентоспособностью МКГ этих энергий с другими генераторами.

Таким образом, описанные генераторы могут использоваться как самостоятельно, так и в составе каскадной системы. Использование разра-



ботанного набора МКГ в сочетании с возможностью согласования их выходных параметров с требованиями нагрузки и формирования импульса существенно расширяет область применения МКГ.

Поступила 26 XI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
2. Gurin V. E., Lyudaev R. Z. et al. MC-2 transformer system.— In: Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, EUR 2750e, Euratom, Brussels, 1966.
3. Shearer J. W. et al. Explosive-driven magnetic field compression generators.— J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, p. 2102.
4. Биченков Е. И. Взрывные генераторы — ДАН СССР, 1967, т. 174, № 1.
5. Cummings D. B. Cascading explosive generators with autotransformer coupling.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N 10.
6. Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с индуктивной нагрузкой.— ЖТФ, 1974, т. 44, № 9. Согласование взрывомагнитного генератора с активной нагрузкой с помощью трансформатора.— ПМТФ, 1973, № 4.
7. Павловский А. П., Босамыкин В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители.— Атомная энергия, 1974, т. 37, № 3.
8. Павловский А. И., Людаев Р. З. и др. Взрывомагнитный генератор.— Бюл. ОИПОТЗ, 1970, № 11.
9. Гаазе В. Б., Шнейерсон Г. А. Высоковольтный кабельный трансформатор для получения сильных импульсов тока.— ПТЭ, 1965, № 6.
10. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомагнитного генератора для питания газового разряда.— ПТЭ, 1973, № 3.
11. Павловский А. И. и др. Импульсный безжелезный бетатрон с питанием от магнитокумулятивного генератора.— Атомная энергия, 1976, т. 41, № 2.
12. Pavlovskii A. I. et. al. Transformer energy output magnetic cumulation generators.— In: Megagauss Physics and Technology. N. Y.: Plenum Press, 1980.

УДК 533 : 538 + 550 : 38

### ГЕНЕРАЦИЯ ТОКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ НЕПРОВОДЯЩЕГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ШАРА, ПОГРУЖЕННОГО В ОДНОРОДНУЮ ПЛАЗМУ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. Г. Пивоваров

(Красноярск)

Исследование движения плазмы в окрестности вращающейся Земли, а также токов и электромагнитных полей, генерируемых этим вращением, представляет одну из центральных задач магнитосферной физики. Для получения представления о структуре возникающей токовой системы и движениях плазмы рассмотрим следующую модельную задачу. Диэлектрический шар радиуса  $r_0$ , окруженный однородной несжимаемой проводящей жидкостью, вращается с угловой скоростью  $\omega$ . В центре шара помещен магнитный диполь, направление момента которого совпадает с направлением оси вращения. Плотность плазмы  $\rho$ , проводимость  $\sigma$  и вязкость  $\mu$  от координат не зависят.

Будем предполагать, что все возмущения, связанные с вращением, по мере удаления от поверхности шара затухают. На самом шаре выполнено условие прилипания, а нормальная компонента тока обращается в нуль.

Поведение плазмы описывается уравнениями магнитной гидродинамики [1]

$$(1) \quad \rho(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} + \nabla(p + H^2/8\pi) = (\mathbf{H}\nabla)\mathbf{H}/4\pi + \mu\Delta\mathbf{u},$$

$$\operatorname{div}\mathbf{u} = 0, \operatorname{div}\mathbf{H} = 0, \operatorname{rot}[\mathbf{u}\mathbf{H}] + \nu_m\Delta\mathbf{u} = 0,$$