

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. Ю. Алексеев, В. А. Битюрин, С. А. Медин,
Вторичные течения в каналах крупномасштабных
МГД-генераторов. Канал с диагонально направ-
ленным магнитным полем, *ТВТ*, 1989, том 27, вы-
пуск 5, 1001–1006

Использование Общероссийского математического портала Math-
Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользователь-
ским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

13 января 2025 г., 15:38:20



УДК 538.4:532.517.4:536.24

ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛАХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ МГД-ГЕНЕРАТОРОВ. КАНАЛ С ДИАГОНАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Алексеев Г. Ю., Битюрин В. А., Медин С. А.

Представлены результаты трехмерных расчетов течений в МГД-каналах различного типа. Рассмотрены фарадеевский канал с диагональной коммутацией электродов, рамочный канал, а также канал рамочного типа с вектором индукции магнитного поля, параллельным диагонали канала. Выполнен сравнительный анализ интегральных и локальных характеристик.

Одной из задач разработки МГД-генератора является определение конфигурации поперечного сечения канала: выбор формы поперечного сечения канала, расположения электродов в поперечном сечении и способы их электрического нагружения. Можно использовать два критерия сопоставления результатов исследований разных конструкций каналов. Во-первых, по интегральным характеристикам, таким, как, например, выходная электрическая мощность, холловская разность потенциалов на рабочем участке канала, длина рабочего участка канала и т. д. Во-вторых, по величинам локальных тепловых, электродинамических и динамических воздействий на стенки канала, определяемых значениями нормальной плотности тока, теплового потока и напряжения трения.

Ранние исследования этой проблемы [1, 2] проводились на базе решения поперечной электрической задачи с использованием газодинамических полей из квазиодномерного решения. Основное внимание уделялось анализу интегральных характеристик каналов. Методика исследований существенным образом основывалась на предположении отсутствия влияния электродинамического взаимодействия на профильные функции скорости и температуры в поперечном сечении. Было обнаружено существенное улучшение интегральных характеристик канала с диагонально-проводящими стенками (ДПС-канал) по сравнению с каналом с изоляционными боковыми стенками (ИБС-канал). Позднее в [3] на базе такой же модели рассмотрен канал квадратного поперечного сечения с четырьмя диагонально-проводящими стенками, помещенный во внешнее магнитное поле, вектор индукции которого направлен по диагонали квадрата (ДНМП-канал). В [3] сделан вывод о преимуществе канала данного типа перед традиционными типами МГД-каналов, в частности ИБС- и ДПС-каналов.

В [4] показано, что в каналах с высоким уровнем МГД-взаимодействия могут развиваться интенсивные вторичные течения (до 30% от основного), что существенно превышает интенсивность прандтлевских вторичных течений в углах канала (1–2% от основного [5]). Трехмерный анализ каналов с диагонально-проводящими (ДПС) и изоляционными боковыми (ИБС) стенками проведен в [6]. Основное внимание уделялось локальным эффектам и сравнению с результатами, полученными с «отключенными» вторичными течениями. Показано, что распределения скорости и температуры в поперечных сечениях каналов существенно определяются вторичными течениями и различаются в каналах различных типов. В [7] впервые описано явление, получившее название магнитоаэротермической (МАТ) неустойчивости, характеризующейся многократным ростом локальной плотности тока на электроде, существенным (на 100–200К) локальным ростом температуры на границе турбулентного пограничного слоя и локальным огровом пограничного слоя на рабочем участке канала. В [8] изучались различные варианты расположения электродов в поперечном сечении канала с целью подавления МАТ-неустойчивости. В [9, 10] сделаны попытки решения проблемы МАТ-неустойчивости в классе каналов с неоднородным магнитным полем. Сравнительный анализ интегральных и локальных характеристик ИБС- и ДПС-каналов в сопоставимых режимах течения и электрического нагружения впервые проведен в [11].

Данная работа выполнена в продолжение [11]. При помощи численного метода и методики сопоставления каналов различных типов, подробно описанных в [11], проведен сравнительный анализ ДНМП-канала с ИБС- и ДПС-каналами.

Конструктивные схемы каналов показаны на рис. 1. Сравнение проводилось

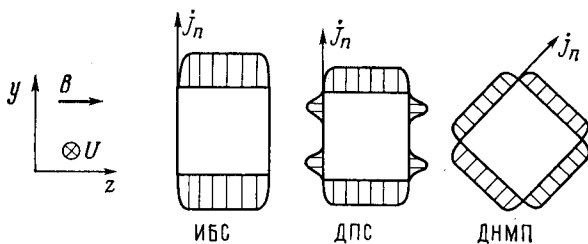


Рис. 1. Распределение плотности тока на стенках каналов МГД-генераторов

для двух режимов течения: номинального — с заданным локальным электрическим КПД в каждом сечении канала: $\eta = 0,75$ при $\eta_m \geq 0,75$ и $\eta = \eta_m$ при $\eta_m < 0,75$, где η_m — максимально достижимый в данном сечении электрический КПД; и частично — с заданным холловским полем $E_x = 1000$ В/м.

Газодинамические параметры потока на входе в рабочий участок и другие параметры, одинаковые для сопоставляемых каналов, приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены наиболее важные интегральные и локальные характеристики каналов различных типов. Интегральные характеристики ДНМП-канала на 3–6% лучше, чем ИБС-каналов, и на 2–4% лучше, чем ДПС-канала.

Отметим, что полученное здесь увеличение интегральных характеристик существенно меньше предсказанного по результатам моделей более низкого уровня соответственно на 15–20% и 7–12% [3].

Причиной этого расхождения являются неучтенные в двумерной модели [3] неоднородности течения с масштабом порядка калибра канала. Так, например, неоднородное распределение проводимости в канале с масштабом неоднородности порядка калибра канала и со степенью неоднородности 10% увеличивает электрическое сопротивление канала на 5–10% по сравнению с величиной сопротивления, вычисленного по среднему значению проводимости. На рис. 2, 3 приведены распределения температуры и продольной компоненты скорости газа в поперечном сечении на выходе из канала для МГД-генераторов рассматриваемых типов при частичном режиме электрического нагружения, $E_x = 1000$ В/м. Они иллюстрируют отличия результатов использования трехмерной модели для расчета каналов крупномасштабных МГД-генераторов от результатов использования моделей более низкого уровня, в которых распределения температуры и скорости в невязком ядре потока считаются однородными.

Как видно из рис. 2, 3, распределения скорости и температуры в выходном сечении канала существенно различаются в каналах различных типов. Эти различия меньше при номинальном режиме течения и заметно больше при частичном режиме. В табл. 2 приведены экстремальные значения величин воздействий на стенки канала, определяемые пространственными распределениями скорости и температуры. Из табл. 2 видно, что в ДНМП-канале стенки подвержены менее интенсивному воздействию. Особенно значительно уменьшение нормальной плотности тока на электрод (13% по отношению к ДПС-каналу и 30% по отношению к ИБС-каналу). Этот результат соответствует данным, полученным при помощи модели более низкого уровня [3], и с этой точки зрения кажется легко объяснимым.

В действительности, однако, такое соответствие результатов означает, что в ДНМП-канале не возникает неоднородностей с характерным размером, много меньшим калибра канала. Отметим, что в ИБС- и ДПС-каналах такие неоднородности с масштабом, много меньшим калибра канала, могут иметь место [7–11]. В то же время величины поперечных неоднородностей течения с характерным размером порядка калибра возрастают в ряду каналов МГД-генераторов ИБС, ДПС- и ДНМП-типов (рис. 2, 3).

Для объяснения преимущественного роста поперечных неоднородностей того или иного масштаба в каналах МГД-генераторов различных типов рассмотрим особенности процесса развития трехмерного течения в этих каналах. В поперечном сечении каналов всех трех типов развиваются вторичные течения примерно одинаковой интенсивности (табл. 2)

Режим работы каналов крупномасштабных МГД-генераторов

Температура продуктов сгорания на входе в канал	2450 К
Угол коммутации электродов	30°
Давление торможения на входе	1,0 МПа
Число Маха на входе	1,42
на выходе	1,07
Максимальное значение индукции магнитного поля	6 Т
Расход продуктов сгорания	230 кг/с
Температура стенок канала	1600 К
Статистическое давление на выходе	85 кПа

Таблица 2

Сравнительные характеристики каналов крупномасштабных МГД-генераторов *

Тип канала	Режим	N, МВт	V _x , кВ	F, м ²	L, м	j _n ^{max} , А/см ²			St _{max}			v _{вых} , м/с		η _{вых} , %
						вход	сере- дина	выход	вход	сере- дина	выход	<v>	v _{max}	
ИБС	ч	106,0	7,6	1,47	7,6	1,09	0,50	0,60	1,18	1,39	1,51	69	191	85,6
	н	204,0	48,3	1,71	13,0	0,88	0,43	0,16	1,18	1,27	1,36	20	50	86,5
ДПС	ч	135,6	10,0	1,87	10,0	1,08	0,46	0,19	1,18	1,39	1,68	64	217	87,6
	н	208,0	47,9	1,73	12,8	0,86	0,38	0,15	1,18	1,30	1,37	18	48	88,1
ДНМП	ч	135,0	9,6	1,85	9,6	0,78	0,40	0,11	1,18	1,33	1,62	72	176	87,4
	н	209,0	47,3	1,74	12,6	0,64	0,30	0,13	1,18	1,25	1,35	24	47	88,3

* N — электрическая мощность, V_x — холловское напряжение, F — площадь выходного сечения канала, L — длина рабочего участка канала, j_n^{max} — максимальная плотность тока на электродах, St_{max} — максимальное число Стантона, <v>, v_{max} — среднеквадратичная и максимальная скорости вторичного течения на выходе, η_{вых} — максимально достижимое в данной конструкции значение КПД на выходе, ч — частичный режим, н — номинальный.

и примерно одинаковой структуры. На рис. 4 приведены картины вторичных течений в каналах ИБС- и ДНМП-типов. Структуры вторичных течений в ДПС- и ИБС-каналах практически совпадают. Эти вторичные течения осуществляют поперечно-конвективный перенос газа и тем самым нарушают однородность течения в поперечном сечении канала.

Вклад поперечно-конвективного переноса в законе сохранения, как известно, для некоторого признака газа Φ описывается выражением

$$K_{\Phi} = \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

где в качестве признака может участвовать, например, скорость газа U или статистическая температура T. Из-за экспоненциальной зависимости электропроводности от температуры наиболее существенное влияние на течение в целом оказывает поперечно-конвективный перенос энергии (температуры).

Влияние поперечно-конвективного переноса на энергообмен в канале, согласно зависимости K_Φ, зависит как от интенсивности вторичного течения, так и от градиента температуры (энтальпии) вдоль направления скорости вторичного течения. Поэтому вторичное течение, локализованное в первоначально однородном ядре потока, влияя на течение в целом почти не оказывает, в то время как поперечно-конвективный перенос энергии внутри турбулентного поперечного слоя вдоль поверхности стенок по периметру канала (рис. 4) оказывает определяющее влияние на течение в целом. В ИБС- и ДПС-каналах неоднородность температуры в турбулентном пограничном слое есть следствие различия пограничных слоев у электродных и боковых стенок. Это различие возникает, возможно, как за счет разной конструкции, а значит и температуры поверхности элект-

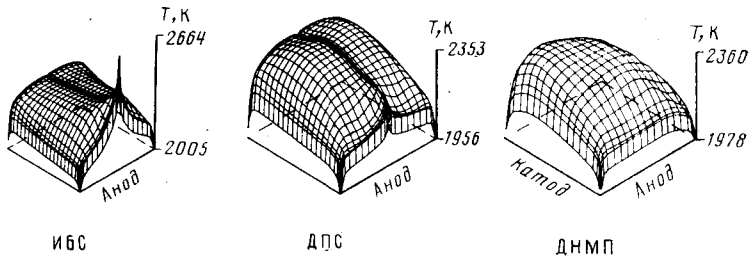


Рис. 2. Распределение температуры в выходных сечениях каналов МГД-генераторов при частичном нагружении

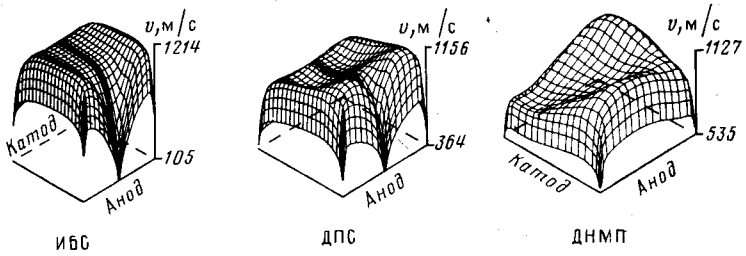


Рис. 3. Распределение скорости в выходных сечениях каналов МГД-генераторов при частичном нагружении

тродных и изоляционных стенок, так и за счет двумерных эффектов в пограничных слоях [12], немонотонного профиля скорости и т. д.

Особенностью ДНМП-канала является однородность конструкции всех стенок канала и сглаживание двумерных эффектов в пограничных слоях. Эти двумерные эффекты, характерные, например, для ИБС-канала, в ДНМП-канале проявляются лишь вблизи углов, а вдали от углов структура неоднородности пограничного слоя носит переходный характер. Вследствие этого более плавного изменения распределения параметров по периметру поперечного сечения воздействие вторичных течений на течение в ДНМП-канале частично подавлено.

В номинальном режиме работы МГД-канала вторичное течение обладает относительно малой интенсивностью. К тому же при этом режиме работы проявляются эффекты обратного влияния изменившихся полей скорости и температуры на вторичное течение в канале [13]. Все это способствует развитию крупномасштабных $\approx d$ неоднородностей в поперечном сечении канала. Эти неоднородности не приводят к экстремальным перегрузкам стенок канала, хотя и влияют на его интегральные характеристики.

В дальнейшем анализ локальных неоднородностей проводится для частичных режимов работы МГД-каналов, являющихся более опасными с точки зрения воздействия на стенки.

Поперечно-конвективный перенос тепла вдоль стенок канала приводит во всех рассматриваемых случаях к захлаживанию периферийной части токовоспринимающей поверхности анода. В случае ИБС-канала это захлаживание приводит к росту плотности электрического тока в центре анода, к росту джоулева тепловыделения в зоне повышенной плотности тока и в конечном счете к МАТ-неустойчивости (рис. 2, 3, 5 для ИБС-канала).

В ДПС-канале также рост электрического сопротивления части приэлектродного слоя вблизи анода влечет за собой увеличение доли тока, стекающего на боковую стенку в анодном режиме. Рост этой доли тока зависит от относительного сопротивления пограничных слоев на боковых и электродных стенках канала и может быть оценен согласно методике

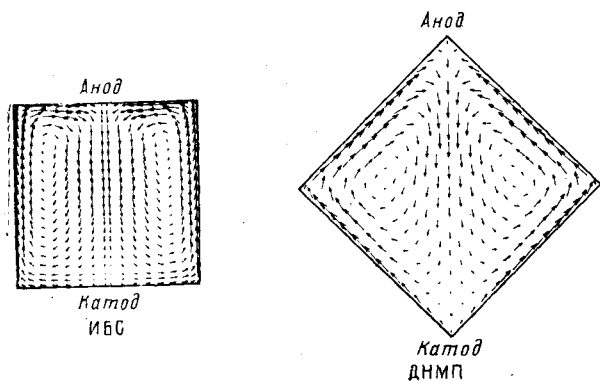


Рис. 4. Картина вторичных течений в каналах МГД-генераторов

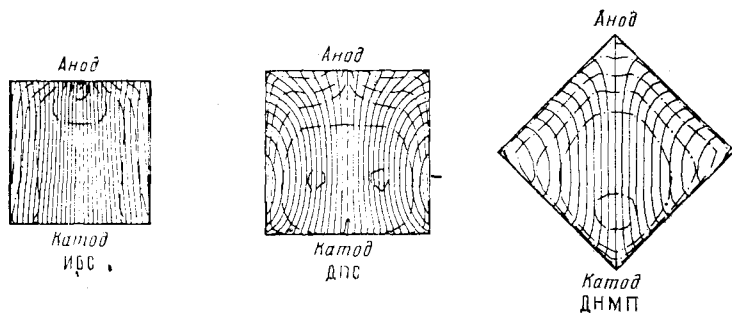


Рис. 5. Линии тока (сплошные линии) и изотермы (штриховые) в каналах МГД-генераторов

[14]. В том случае, если пограничный слой на боковой стенке канала оказывается достаточно горячим, остатка тока, приходящего на анодную стенку, оказывается недостаточно для развития МАТ-неустойчивости (как и в данной работе). Уменьшение величины рабочей компоненты тока вблизи анода приводит к снижению объемного МГД-взаимодействия, что влечет за собой развитие анод-катодной асимметрии (рис. 2, 3, 5, для ДПС-канала).

В ДНМП-канале захлаживание периферийной части анодной стенки происходит одновременно с образованием относительно холодной области в центре анода, который находится в углу поперечного сечения канала. Поэтому МАТ-неустойчивость оказывается полностью заблокированной в этом канале. Другой особенностью ДНМП-канала является то, что ток в ядре протекает перпендикулярно вектору индукции магнитного поля, а в турбулентных пограничных слоях он поворачивает на 45° и течет перпендикулярно поверхности стенок канала. Из-за уменьшения температуры и увеличения толщины пограничных слоев вблизи анода область протекания тока по нормали к стенке в анодной половине канала расширяется, а в катодной для обеспечения условий сохранения полного тока заметно стягивается к углу канала. Протекание тока в поперечном сечении носит существенно двумерный характер: в катодной половине канала ток течет преимущественно поперек магнитного поля, а в анодной — по нормали к стенкам канала, причем в некоторых точках имеет место даже «избыточный» разворот тока на угол, превышающий 45° . Это распределение тока порождает существенную анод-катодную асимметрию с характерным масштабом порядка калибра канала. Степень этой неоднородности заметно превышает степень неоднородности в ДПС-канале.

Таким образом, при переходе от системы с жесткой электрической конфигурацией ИБС-канал, в котором протекание тока возможно только между противоположными стенками канала, к системе со свободной электрической конфигурацией — ДНМП-канал, в котором в рамках линейной

электродинамики все четыре стенки являются равноправными, происходит увеличение поперечного масштаба неоднородности течения от размера порядка толщины пограничного слоя до величины порядка калибра канала. Кроме того, можно сделать вывод, что МАТ-неустойчивость не является эффектом, обусловленным только структурой вторичного течения в канале, а существенным образом определяется расположением электродов в поперечном сечении канала и способом их электрического нагружения. Причем наиболее эффективным способом подавления МАТ-неустойчивости является не ликвидация электрода в зоне проявления МАТ-неустойчивости, как это, например, предлагается в [8], а создание необходимых условий для протекания тока на возможно большую часть рабочей поверхности канала. С этой точки зрения ДНМП-канал является наиболее эффективным. Поскольку при этом его интегральные характеристики оказываются не только не хуже характеристик ИБС- и ДПС-каналов, а даже, хотя и незначительно (на 3–5%), выше их, можно сделать вывод о преимуществе ДНМП-канала по совокупности интегральных и локальных характеристик для крупномасштабных МГД-генераторов.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2.XII.1988

ЛИТЕРАТУРА

1. Битюрин В. А., Бураханов Б. М., Желнин В. А. и др. // ТВТ. 1971. Т. 15. № 2. С. 390.
2. Битюрин В. А., Медин С. А. // ТВТ. 1977. Т. 15. № 5. С. 1086.
3. Белоглазов А. А., Берковский Б. М. // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290. № 5. С. 1112.
4. Битюрин В. А., Зателепин В. Н., Любимов Г. А. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 1. С. 3.
5. Oliver D. A., Maxwell C. D. // AIAA Paper N 77-108, AIAA XVth Aerospace Science Meeting, January 1977. 13 p.
6. Ahluwalia R. H., Vanka S. P. // In: XIX Symp. on Eng. Aspects on MHD, Tennessee, 1981. P. 5.1.1.
7. Demetriades S. T., Oliver D. A., Swean T. F., Maxwell C. D. // AIAA Paper N 81-0248, AIAA XIX Aerospace Science Meeting, St. Louis, Missouri, 1981.
8. Maxwell C. D., Swean T. F., Wetter A. A. et al. // AIAA Paper N 81-1231. AIAA XIV Fluid and Plasma Dyn. Conf., Palo Alto, California, June, 1981. 20 p.
9. Алексеев Г. Ю., Битюрин В. А., Желнин В. А. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 1. С. 9.
10. Lu B., Schmidt H. J., Scott M. U., Wu Y. C. L. // AIAA Paper N 1058, AIAA/ASME IV Fluid Mechanics (Plasma Dynamics) Laser Conference, Atlanta, GA, 1986.
11. Alekseev G. Yu., Bityurin V. A., Medin C. A. // In: IX Int. Conf. on MHD Power Generation. 1986. V. 2. P. 404.
12. Битюрин В. А., Желнин В. А., Сагановский В. Р. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 3. P. 78.
13. Алексеев Г. Ю., Битюрин В. А. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 6. С. 1242.
14. Алексеев Г. Ю., Битюрин В. А. // ТВТ. 1989. Т. 27. № 1. С. 136.