

ОБЗОР

ПРОБЛЕМЫ МГД-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

С. А. Медин, В. А. Овчаренко, Э. Э. Шпильрайн

Все возрастающие потребности в электроэнергии заставляют ученых и инженеров во всем мире задумываться о новых достаточно экономичных и эффективных путях преобразования тепловой энергии в электрическую. Коэффициент полезного действия такого преобразования и стоимость оборудования, используемого для этой цели, — две главные составляющие, характеризующие конкурентоспособность соответствующего метода. Наряду с этим при производстве больших количеств электроэнергии необходимо считаться с возможным химическим и тепловым загрязнением окружающей среды, в связи с чем всякий новый метод преобразования энергии должен быть прогрессивным и в этом отношении.

В последнее десятилетие во многих странах был предпринят большой комплекс научных исследований, проведены проектные и конструкторские проработки, показавшие перспективность для большой энергетики МГД-метода преобразования энергии.

Работы в области МГД-преобразования энергии с самого начала проводились на основе широкой международной кооперации. Начиная с 1962 года этой проблеме было посвящено пять международных конференций и большое число национальных симпозиумов с широким международным представительством. В 1966 году Международное и Европейское агентства по атомной энергии создали Международную группу связи (МГС), призванную информировать научную и техническую общественность о состоянии дел в области МГД-метода преобразования энергии и способствовать скорейшему внедрению его в жизнь. Одной из форм деятельности МГС является подготовка и издание статус-репортов — докладов, посвященных современному состоянию проблемы и ее дальнейшим перспективам [1, 2].

Настоящий обзор представляет собой краткое изложение состояния проблемы создания МГД-генераторов, сделанный на основе статус-репорта, подготовленного по материалам последней Международной конференции, проходившей в Мюнхене в апреле 1971 г. [3].

МГД-генераторы открытого цикла

1. Экспериментальные и опытно-промышленные МГД-установки открытого цикла. Последние годы характеризуются широким развитием работ в области МГД-установок открытого цикла во многих странах, в частности, в ФРГ, Японии, Польше, США, СССР. Можно указать преобладающие тенденции развития проблемы за эти годы. Наряду с расширением объема экспериментальных исследований значительное внимание уделяется опыту эксплуатации крупных установок, производящих электроэнергию, а также экспериментальному изучению и отработке конструкций МГД-канала и вспомогательного оборудования. В этом отношении большим успехом явился физический пуск в Советском Союзе установки У-25. В последние годы был спроектирован и создан ряд новых экспериментальных установок. Большая часть действующих в настоящее время МГД-генераторов, характеристики которых приведены в табл. 1, представляют собой установки длительного действия, предназначенные преимущественно для ресурсных испытаний и моделирования базовых МГД-установок. Ниже следует краткое описание работающих и проектируемых МГД-установок.

В ФРГ Институтом физики плазмы им. Макса Планка совместно с фирмой «МАН» создан модельный МГД-генератор тепловой мощностью 14,5 Мвт и разработан проект МГД-генератора электрической мощностью 10 Мвт с длительностью работы 10 сек, предназначенного для энергопитания экспериментальных плазменных установок [4]. Фотография модельной установки приведена на рис. 1. Отличительной особенностью обеих установок является стремление обеспечить получение наибольших значений удельной электрической мощности с единицы объема канала. С этой целью оба МГД-генератора имеют сверхпроводящую магнитную систему. Для повышения температуры горения осуществляется ввод различных добавок (алюминий и др.).

Экспериментальный МГД-генератор длительного действия тепловой мощностью 2 Мвт «Фегас» построен в ФРГ Ядерным исследовательским центром (ЯИЦ) в Юлихе совместно с фирмой «Бергбауфоршунг», Эссен (ББФ) [5]. Генератор «Фегас» предназначен для выяснения работоспособности материалов и обработки элементов конструкции и получения исходных данных для создания проектируемого крупного МГД-генератора тепловой мощностью 30 Мвт.

В Японии продолжались работы на установке длительного действия Марк-II ЭТЛ в Электротехнической лаборатории, Токио [6]. Были исследованы два варианта канала: «горячий» и «теплый». Было установлено, что мощность «горячего» канала со стенками из окиси магния на порядок превосходит мощность «теплого» канала со стенками из окиси алюминия. На установке Марк-II ЭТЛ используется регенеративный подогрев воздуха до 1300° С в теплообменнике с шариками из окиси алюминия. Электротехнической лабораторией на установке Марк-III ЭТЛ проведен комплекс исследований поведения стенок МГД-канала и их защиты вдувом [7]. Общий вид установки представлен на рис. 2.

Проведен комплекс исследований на установке длительного действия тепловой мощностью 3 Мвт в Институте ядерных исследований в Сверке, Польша [8]. Были начаты испытания канала с изоляционными стенками, представляющими многослойную композицию металл — керамика (окись алюминия), изготовленную методом плазменного напыления. Установка имеет высокотемпературный воздухоподогреватель с движущейся насадкой из окиси алюминия, который был испытан на различных режимах работы, включая предельные температуры подогрева. На последующем этапе работ предполагается увеличить тепловую мощность установки до 30 Мвт, используя кислород в качестве окислителя и металлический теплообменник для упрощения схемы установки.

В США продолжались разработки и исследования МГД-генераторов кратковременного действия. В Институте космических исследований ИКИ университета Теннесси, Туллахома, и Исследовательской лаборатории фирмы «Авко», Эверетт, изучены характеристики серийных неохлаждаемых МГД-генераторов [9, 10]. На МГД-генераторе в Туллахоме (рис. 3) исследовано влияние различных добавок в топливо и вида соединения присадки на генерируемую мощность канала с диагональными короткозамкнутыми электродами.

Серийный МГД-генератор Марк-II АПЛ (рис. 4) с неохлаждаемыми модульными металлическими стенками был создан и испытан фирмой «Авко». Исследование этой установки продемонстрировало возможность создания высокоэффективного генератора с одной нагрузкой в условиях развитого эффекта Холла. Генератор Марк-II АПЛ обладает рекордными для данного типа машин удельными характеристиками (мощность на единицу расхода 0,5 Мдж/кг, мощность на единицу объема 80 Мвт/м³, коэффициент преобразования 0,05). В генераторе Марк-II АПЛ успешно работали восстанавливаемые электроды на основе двуокиси циркония и было организовано безотрывное сверхзвуковое течение при сильном МГД-взаимодействии. В настоящее время в Исследовательской лаборатории «Авко» завершается создание длительно действующего серийного МГД-генератора Марк-VI.

В СССР исследования МГД-генераторов проводятся на установках Института электродинамики Академии наук Украинской ССР в Киеве [11], Энергетического института им. Г. М. Кржижановского (ЭНИН-2) [12] и Института высоких температур АН СССР (ИВТАН) [13, 14].

Установка Института электродинамики (рис. 5) введена в действие в 1970 г. Схема установки, кроме обычных элементов длительно действующих МГД-генераторов с воздухоподогревом, включает в себя парогенератор, питающий два турбогенератора. Основная цель исследований — изучение особенностей совместной работы МГД-генератора и паротурбогенератора. В настоящее время идет освоение установки и исследование ее характеристик.

Исследования, проведенные на установке ЭНИН-2, продемонстрировали работоспособность охлаждаемого модульного канала с латунными электродами на форсированных режимах с частыми пусками и остановками. В режиме осаждения присадки на поверхность электродов рабочие токи на единичный электрод могут достигать значений 100 а.

На установке У-02 (ИВТАН) завершен план второго этапа ее развития. Реконструирована схема установки. Наиболее важные результаты получены при испытании холодных каналов. Было показано, что полусферические и выступающие в поток металлические электроды при соответствующей организации режима тепло- и массообмена на поверхности обеспечивают длительный (~ 100 час) режим работы. Эффективно работают также модульные изоляционные стенки. Высокотемпературный воздухоподогреватель проработал свыше 7000 час при температуре подогрева 1600° С. Изучено поведение присадки в холодном канале, модельном парогенераторе и различных системах вывода.

В марте 1971 г. был осуществлен физический пуск установки У-25 (ИВТАН) (рис. 6). При последующих пусках опробованы при совместной работе все системы установки: кислородный завод, воздушные компрессоры, высокотемпературные воздухоподогреватели, камера сгорания, канал, парогенератор, системы ввода и вывода присадки и пр. В воздухоподогревателях достигнута проектная температура подо-

№ п/п	Страна, установка	Время работы	$P_{\text{тепл. Мет}}$	$P_{\text{эл. Мет}}$	$\eta, \%$	$P_{\text{эл.}} \text{ МДж/кг}$	Кол-во пре-образования	Топливо	Окислитель, температура подогрева, °С	Размеры канала, см ³	$V_{\text{эл.}} \text{ Мет/м}^3$	$T_0, \text{ }^\circ\text{K}$	$P_0, \text{ ат}$	M	Материал электродов, их число	$V, \text{ мл}$	Присадка
1	ФРГ а) * ИФП, МАИ б) ИФП, МАН	10 сек 5 сек	12 14,5	10 0,08 0,45	11,6 1,7	0,86 0,017 0,264	0,083 0,0055 0,031	Керосин »	O ₂ O ₂	— — F ₁ =20 см ² F ₂ =60 см ² L=160	— 12,5 70,3	3170 3250	15 15	1,5 1,5	Медь, 150 пар	5	Октоат калия
	в) * ЯИЦ, ББФ	500 час	30	1,7	8	0,21	0,057	Газ	O ₂ /N ₂ = = 1/2, 730	14×14 11×28 L=200	31,5	2890	—	0,85	72 пары	5	1% КОН
	г) ЯИЦ, ББФ (Фегаз)	10 мин	2	—	0,25	—	—	Пропан	O ₂	5×5×110	—	2850	—	0,90	Мегалт 12 пар	1,4	Калий
2	ЯПОНИЯ а) ЭТЛ (Марк II) «горячий» канал	длит.	10	0,251	2,5	0,10	0,025	Газ, нефть	O ₂ /N ₂ = 1/2, 1300	9×15 9×25 L=120	11,6	2775	2,8	>1	Графит, 30 пар	3,3	В топливе 1% K ₂ CO ₃ (порошок)
	«теплый» канал	длит.	»	0,019	2,5	0,0076	0,0019	»	То же	То же	0,88	2775	2,8	>1	ZrB ₂ (80%) ZrO ₂ (20%) 12 пар	3,3	То же
	б) ЭТЛ (Марк III)	100 час	3,6	—	0,5	—	—	Мазут	Воздух+O ₂	3×12×90	—	—	—	0,8	—	1,9	КОН
3	ПОЛЬША а) ИИИ	длит.	3	—	0,8	—	—	—	Воздух, 1280 O ₂	— —	— —	2200	—	—	—	—	КОН в спирте
	б) * ИИИ	1 час	30	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	»
4	США а) ИКИ	8 сек	8,35	0,2	0,8	0,25	0,21	Керосин + Al и уголь	O ₂	9,5×20,5× ×120 2,6×10 7,2×11 L=85	8,6 80	3200 3300	4,5—3 9—12	0,8— 1,6 2,18	Медь, 260 пар	2,2	КОН и KNO ₃ в спирте
	б) Авко (Марк II АПЛ)	5 сек	7,5	0,4	0,8	0,5	0,5	Толуол	O ₂	—	—	—	—	—	Медь с покр. ZrO ₂	2,6— 3,5	в воде
	в) Авко (Марк VI) *	200 час	20	0,5	3	0,17	0,05	Нефть	O ₂	F ₁ =100 см ² F ₂ =800 см ² L=200	12,5	3200	8	2	100 пар 100 »	3,3	K ₂ CO ₃ в воде
5	СССР а) ИЭЛ, б) ЭНИН	3 час 10 мин	8,35 140—160	0,015 0,2—1,5	2 12—14	0,0075 0,014 0,10	0,0016 0,0013 0,01	Газ Газ	O ₂ /N ₂ = 2/3 O ₂	— 20×20 20×50 L=300	— 1—7,5	2850 3200	— 8—12	0,7 2	SiC, 6 пар Латунь, 116 пар	1,5 1,5	КОН в спирте K ₂ CO ₃ в воде
	в) ИВТАН (У-02)	200 час	5	0,075	1	0,075	0,015	Газ	O ₂ /N ₂ = 1/1 1100	20×6,4 40×6,4 L=300	1,32	2900	1,2	0,8	ZrO ₂ и SiC 52 пары	1,7	Cs ₂ CO ₃ в воде
	г) ИВТАН (У-25) *	1000 час	300	25	50	0,5	0,083	Газ	O ₂ /N ₂ = 2/3, 1200	38×77 38×138 L=500	12	2900	2,7	0,8	Медь, керамика	2	65% K ₂ CO ₃ в воде

* Расчетно-проектные данные.

грева 1200°C . В канале получены расчетные величины скоростей и напряжения холостого хода. Канал проработал под частичной нагрузкой первые десятки часов. В ближайшем будущем планируется вывод установки на номинальные параметры.

2. Физические и газодинамические проблемы. В истекший со времени Варшавского симпозиума период исследовались и разрабатывались преимущественно МГД-генераторы линейной конфигурации. Дисковые генераторы, несмотря на целый ряд

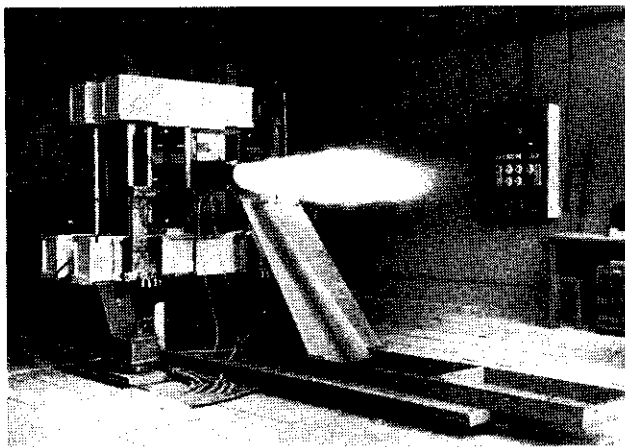


Рис. 1. МГД-генератор Института физики плазмы и фирмы «МАН», Мюнхен, ФРГ

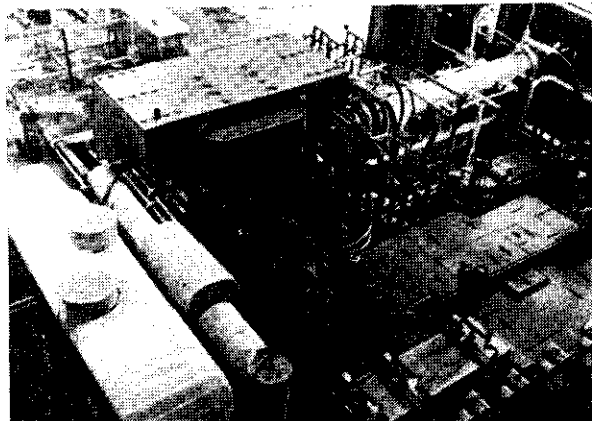


Рис. 2. МГД-установка Марк-III Электротехнической лаборатории, Токио, Япония

очевидных преимуществ [15], практически не изучались и до настоящего времени нет прямых исследований, определяющих область параметров, где дисковые капа-лы оказываются предпочтительнее линейных.

Применительно к линейным МГД-генераторам основное внимание уделялось исследованию газодинамических и электродинамических характеристик и сравнению опытных данных с расчетными [10, 13]. Хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента позволяет считать, что современные представления об основных явлениях, протекающих в канале, достаточно полны, и их учет в рамках гидравлической квазидвумерной модели осуществляется правильно. Усовершенствованные с учетом неоднородных эффектов методы расчета МГД-каналов достаточно надежны и обеспечивают определение интегральных характеристик генератора с погрешностью около 10—20%.

Двумерные электродинамические краевые эффекты изучены достаточно глубоко и полно на основе решений модельных задач [16]. Разработаны эффективные методы оценок влияния продольных и поперечных краевых эффектов на характеристики МГД-генератора. Существуют довольно ясные представления о рациональном распределении магнитного поля и нагрузки генератора в концевых областях. В то же

время значительный интерес представляют задачи о протекании токов в средах с неоднородным распределением параметров при наличии эффекта Холла [17—20]. Эти вопросы решаются не только теоретически, но и экспериментально [21—23]. Наличие холодного пограничного слоя на электродах приводит к сглаживанию неоднородности продольного распределения [24] и сильной неравномерности поперечного (к направлению течения) распределения тока [20, 25], характеризующейся концентрацией плотности тока в углах поперечного сечения канала. Выдвинутое в связи с последним обстоятельством оригинальное предложение об использовании коробчатых электродов [21, 22] дополняет возможности улучшения характеристик МГД-генератора, которые были продемонстрированы с помощью выступающих в поток электродов [7, 13].

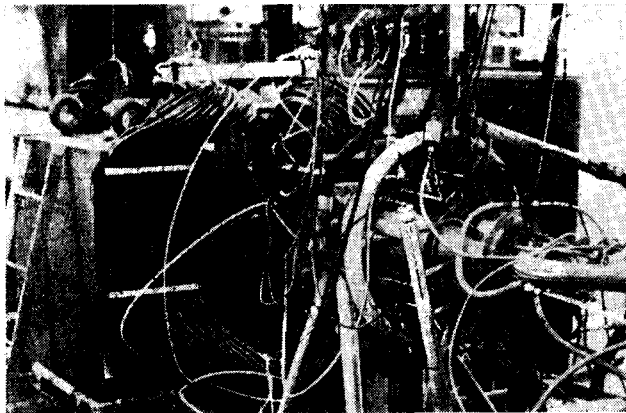


Рис. 3. МГД-генератор Института космических исследований Университета Теннесси, Туллахома, США

Значительный интерес представляют исследования взаимодействия плоских электрических полей и высокоскоростного потока сжимаемого газа. Неравномерно распределенные в канале электромагнитные силы могут приводить к резкой перестройке невязкого течения в ядре потока [26]. Большая часть исследований двумерной газодинамики МГД-канала проводилась без учета влияния ее на электродинамику. В настоящее время плоские задачи, в которых совместно рассматриваются газодинамика и электродинамика канала, несмотря на чрезвычайные вычислительные трудности, привлекают все больше внимания [27]. В связи с этим представляют большой интерес экспериментальные исследования распределения не только электродинамических, но и газодинамических переменных в МГД-каналах [28, 29].

Как и в предыдущие годы продолжалось изучение пульсаций параметров плазмы в МГД-генераторах [11, 30]. Эти работы имеют большое значение для разработки методов подавления пульсаций, приводящих к снижению эффективной электропроводности плазмы и ухудшению качества вырабатываемой электроэнергии.

На предыдущих симпозиумах отмечалось, что характеристики МГД-генераторов с сильным взаимодействием ухудшаются в результате отрыва пограничного слоя. Это явление подробно изучалось в последние годы экспериментально [31], были разработаны методы расчетных оценок условий его возникновения [18]. Все это позволило сформулировать соответствующие рекомендации и реализовать безотрывное течение в МГД-генераторе с большим коэффициентом преобразования энергии [10].

Значительное внимание было уделено проблеме пограничного слоя при наличии вдува, осуществляемого для защиты электродов [32, 33].

Одной из основных причин, приводящих к снижению характеристик экспериментальных генераторов, являются утечки холловских токов. В работах [34, 35] был выполнен анализ природы закорачивания холловских токов и предложены удовлетворительные расчетные модели, учитывающие реальные свойства потока и стенок канала. Весьма интересные данные о распределении и утечках тока получены в результате тонкого эксперимента на сравнительно небольшой установке [36].

В области диагностики плазмы интенсивно разрабатывались методы измерений температуры плазмы, концентрации атомов присадки и проводимости. Увеличилась точность определения температуры. Для определения температуры ядра потока развит визуальный метод обращения спектральных линий [29, 37], в котором производится учет влияния холодных пограничных слоев на выход излучения плазмы в спектральных линиях.

Для определения распределения температуры плазмы внутри канала успешно используются спектральные и зондовые методы [29, 38]. Спектральный метод основан на фотометрировании снимка картины неоднородной плазмы [29], зондовый спо-

соб — на снятии и обработке вольт-амперных характеристик, перемещающихся в плазме зондов [38]. В работе [29] концентрация атомов калия впервые определена по самообращенным контурам спектральных линий.

Продолжалось исследование проводимости плазмы продуктов сгорания с добавками легкоионизирующихся соединений. Уточнение методики расчетов проведено в [39]. При аккуратно выполненном осреднении сечений столкновений по энергиям электронов и уточнении значений сечений упругих столкновений отдельных компонент расчеты хорошо согласуются с экспериментом. Экспериментальные исследования электропроводности проведены в [40, 41].

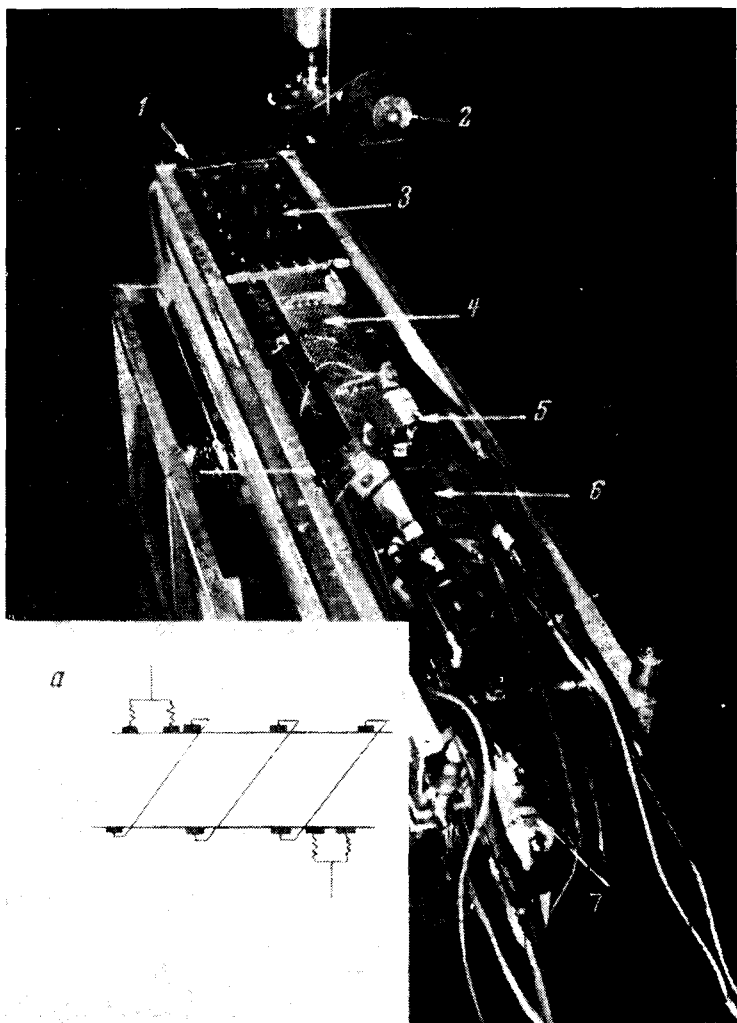


Рис. 4. МГД-генератор Марк-II АПЛ Исследовательской лаборатории фирмы «Авко», Эверетт, США

a — схема канала; 1 — шкала в дюймах; 2 — система ввода присадки; 3 — диффузор; 4 — канал генератора; 5 — сопло; 6 — камера сгорания; 7 — клапан подачи топлива

Представляют интерес исследования влияния возникновения твердой фазы в продуктах сгорания на их проводимость [42]; обнаружен рост проводимости при наличии процесса кристаллизации частиц.

3. Приэлектродные и пристеночные явления в канале МГД-генератора. Исследования, связанные с созданием конструкций электродных и изоляционных стенок с большим ресурсом работы в рабочих условиях канала МГД-генератора, включают изучение различных пристеночных эффектов, в частности, приэлектродных пограничных слоев и их влияния на характеристики МГД-генераторов, поведения дуговых

разрядов на «холодных» электродах и распределения потенциалов вблизи электродов электрофизических свойств изоляционных стенок.

Все разнообразные виды конструкций стенок каналов, испытания которых проводились в последнее время, можно условно разделить на две основные группы — «горячие» и «холодные».

Характеристики МГД-генераторов с горячими стенками определяются в первую очередь температурой электродов и толщиной пограничного слоя. Эксперименты, проведенные на установке Марк-II ЭТЛ [6], показали, что при практически одинако-

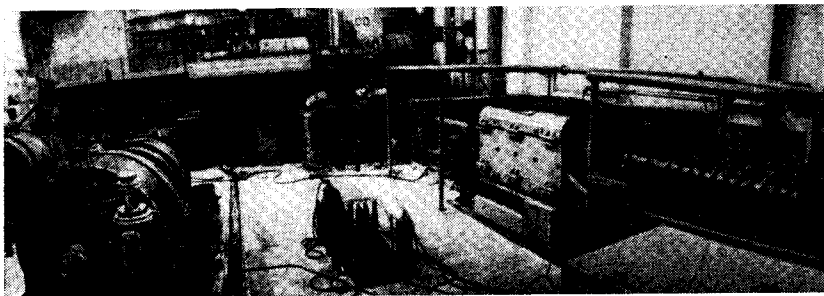


Рис. 5. МГД-установка Института электродинамики Академии наук Украинской ССР, Киев

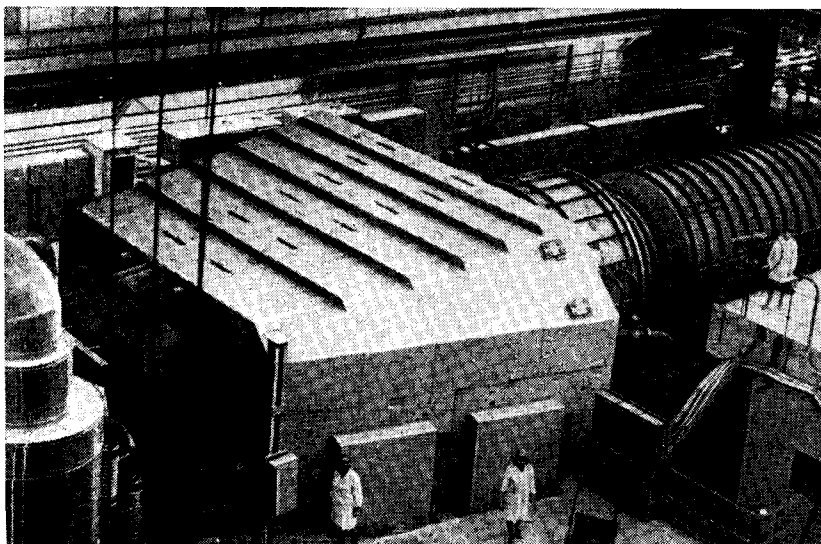


Рис. 6. МГД-генератор установки У-25

вых газодинамических параметрах потока на входе в канал уменьшение температуры электродных стенок на порядок снижает мощность генераторов. Аналогичные выводы были сделаны в [43].

Высокие удельные мощности и малое влияние приэлектродных пограничных слоев в случае высокой температуры электродов были особенно наглядно продемонстрированы в [10]. В [21] было проведено систематическое исследование влияния пограничных слоев на характеристики МГД-генератора при различных температурах стенок в широком диапазоне чисел Холла.

Приэлектродные падения напряжения особенно велики в случае «холодных» электродов. В ряде работ [12, 44] было отмечено весьма высокое напряжение зажигания дуговых разрядов на поверхности «холодных» металлических электродов (от нескольких десятков до нескольких сотен вольт). Как показывают исследования [13, 44, 45], эффективное приэлектродное падение напряжения при работе в дуговом режиме также является сравнительно высоким.

В ряде работ отмечается значительное (в несколько раз) увеличение силы тока на электроды при их выдвигении за относительно холодный пограничный слой на

электродной стенке [7, 12, 21, 45]. Однако выдвигание электродов в поток приводит одновременно к увеличению обратных перетеканий токов в продольном направлении [21], поэтому, очевидно, существует оптимальная степень выдвигания электродов [46].

Значительное внимание уделяется разработкам и исследованиям способов защиты электродных стенок. В работе [32] показано, что применение пористого охлаждения для защиты электродов от высокотемпературного воздействия потока, позволяет на два порядка уменьшить эрозию материалов на основе ZrB_2 , ZrO_2 . Ресурс работы электродов из ZrB_2 может составлять около 1000 часов при плотностях тока более 2 а/см^2 . Однако даже небольшие расходы вдуваемого газа (порядка 4—5%) могут приводить к значительным неоднородностям в пограничных слоях и ухудшению характеристик МГД-генератора.

Интересные результаты были получены при исследованиях «горячих» изоляционных стенок с применением высокотемпературной керамики [13, 47]. Показано, что секционирование керамической стенки позволяет существенно повышать ее термостойкость и изоляционные свойства.

Достаточно подробно изучалось поведение дуг на «холодных» электродах. Установлено, что чем больше градиенты скорости потока на поверхности электрода, тем более быстрым является движение дуг, и тем меньше эрозия вызывают катодные пятна в силу малого разогрева поверхности. Наиболее заметная эрозия наблюдается на концах плоских электродов, где пограничный слой является наиболее развитым и время пребывания дуг максимально [48]. С этой точки зрения выступающие в поток за пограничный слой электроды могут иметь преимущества, но и на таких электродах электродные пятна дуги концентрировались в вихревой зоне отрыва пограничного слоя, что вызывало в этих местах более заметную эрозию [13].

Большое влияние на эрозию электродов оказывают материал, температура поверхности, величина тока и условия осаждения соединений калия [13]. Медь, обладающая высокой теплопроводностью, является наиболее перспективным из доступных материалов. При конструировании электродов необходимо учитывать не только большие тепловые потоки к холодным стенкам из-за конвективного теплообмена, экспериментально определенные в ряде работ [12, 49], но и дополнительный тепловой поток внутрь электродов от катодных пятен, составляющий $\sim 20 \text{ вт/а}$ на электрод [44].

4. Основные элементы МГД-установок. Современное развитие исследований по МГД-проблеме отмечено стиссительным увеличением числа работ по вспомогательному оборудованию и элементам МГД-электростанций. Наибольшее внимание было уделено системам ввода и вывода присадки, высокотемпературным воздухоподогревателям, камерам сгорания, магнитным системам и инверторам.

В качестве ионизирующей присадки, как правило, используется калий и лишь в отдельных случаях — цезий. Калий обычно вводится в камеру сгорания в виде водного раствора K_2CO_3 , водного или спиртового раствора КОН, а также в виде порошка K_2SO_4 .

Основной проблемой ввода является организация полной равновесной ионизации присадки до попадания в канал МГД-генератора. Особенно наглядно этот факт демонстрируется данными [12].

Большой интерес представляет изучение поведения присадки в газовом тракте МГД-установки [13, 50]. В [13] экспериментально исследованы процессы отложения присадки на теплообменной поверхности, выявлены зоны конденсации паров КОН и осаждения твердых частиц K_2CO_3 , а также расплава смеси $K_2CO_3 + КОН$.

В [51] предложена методика расчета процесса конденсации присадки (паров КОН) из потока продуктов сгорания и сделана оценка интенсивности этого процесса.

Ведутся исследования в области улавливания присадки. Необходимая степень улавливания (99%) достигается обычно путем применения рукавных фильтров из стеклоткани [13] или системой с турбулентным барботером [13, 52]. Однако эти способы либо неэкономичны, либо имеют большие гидравлические потери [13]. Весьма обнадеживающие результаты дали испытания мокрого электростатического фильтра на установке У-02 [13], где получен коэффициент улавливания присадки (K_2CO_3) свыше 95%.

В настоящее время наиболее перспективными с точки зрения возможности реализации и надежности работы представляются следующие два типа высокотемпературных воздухоподогревателей: регенератор с неподвижной шаровой насадкой и клапанным газораспределением и регенератор с движущейся шаровой насадкой (промежуточным теплоносителем).

Эти два типа воздухоподогревателей исследовались в [8, 13, 53].

Особый интерес представляют результаты исследования работы воздухоподогревателя при наличии щелочной присадки [54]. Было обнаружено, что огнеупорные материалы такие, как окись алюминия и двуокись циркония, практически не могут работать длительное время в контакте с продуктами сгорания, содержащими щелочную присадку. В этой среде они подвергаются сильной коррозии. Исключение составляет лишь окись магния, которая оказалась достаточно устойчивой к этой среде в широком интервале температур.

Создание камер сгорания на газообразном и жидком топливах, предназначенных

для работы в МГД-установках, в настоящее время можно считать проблемой, практически решенной. Примерами могут служить камеры сгорания установок Марк-V, ЛОРХО (США), У-02, ЭНИН-2, У-25 (СССР). Сложнее обстоит дело с камерами сгорания для сжигания угля, поскольку высокотемпературное сжигание твердого топлива представляет собой принципиально новую задачу. В работе [55] исследована камера сгорания, в которой сжигалась угольная пыль в подогретом и обогащенном кислородом воздухе. Был достигнут уровень нагрузки камеры 26 $Мвт/м^2$.

Поиски оптимальной системы инвертирования постоянного тока МГД-генераторов показали, что даже для фарадеевского МГД-генератора с большим количеством секционированных электродов экономичная инверторная установка является вполне реальной. Это подтвердили данные опытной эксплуатации многоэлементной инверторной установки МГД-генератора У-02 [13].

5. Техничко-экономические аспекты. Одним из наиболее важных для МГД-установок открытого цикла является вопрос о правильном выборе верхней температуры рабочего тела, обеспечиваемой тем или иным подогревом воздуха в сочетании с некоторым обогащением его кислородом [56]. Наряду с обогащением воздуха кислородом, в ряде работ [56, 57] рассматривается другая возможность снижения температуры подогрева воздуха — химическая регенерация тепла, позволяющая существенно повысить к.п.д. МГД-электростанции.

Значения к.п.д. МГД-электростанции в зависимости от принятой температуры подогрева окислителя по данным различных фирм и организаций в различных предположениях и при разных исходных данных иллюстрируются рис. 7 [58]. Как видно из этого графика, при температуре подогрева окислителя до $1600\text{--}1900^\circ\text{C}$ к.п.д. в

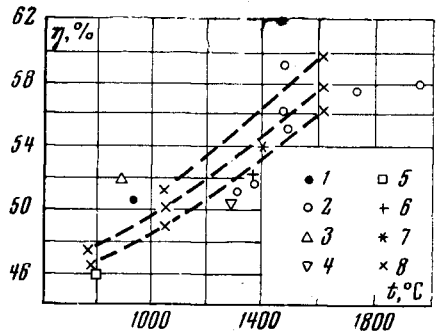


Рис. 7. Тепловая эффективность базовых МГД-электростанций (к.п.д.) в зависимости от температуры подогрева окислителя по данным:

1 — Вестингауз, США; 2 — ИВТАН, СССР; 3 — Горнорудное управление, США; 4 — Электрисите де Франс, Франция; 5 — Браун — Бовери, Швейцария; 6 — Институт теплотехники, Польша; 7 — Сименс — Шуккерт, ФРГ; 8 — Авко, США

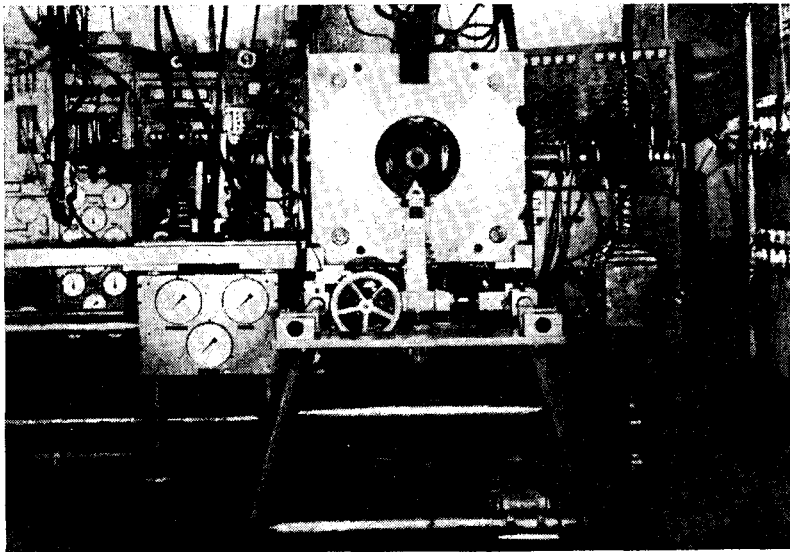


Рис. 8. МГД-установка замкнутого цикла в Гархинге, ФРГ

будущем может достигать значения 60%. Оценки экономических показателей мощных базисных МГД-электростанций проводились как в СССР [59], так и в США [60]. Они показали, что даже МГД-электростанции первого поколения (с оценкой удельных капиталовложений на базе современной технологии) могут успешно конкурировать с обычными тепловыми электростанциями при средней стоимости топлива.

При сравнении МГД-электростанций с паротурбинными и особенно с атомными электростанциями всегда следует иметь в виду меньший уровень теплового загряз-

нения окружающей среды и меньшую потребность в охлаждающей воде, что пока, к сожалению, не поддается строгим экономическим оценкам.

Значительное внимание было уделено разработкам схем пиковых и аварийных МГД-электростанций (продолжительностью работы в год 300 и более часов). Такие станции должны быть максимально простыми, что предполагает и малую удельную стоимость 1 кВт установочной мощности.

Простейшая пиковая МГД-установка, являющаяся по оценкам [61] наиболее перспективной, может работать на продуктах сгорания жидкого топлива (керосин, нефть, сжиженный газ) в жидком кислороде без утилизации тепла после МГД-генератора в паротурбинной или газотурбинной установке, что обеспечивает быстроту запусков и маневренность. Жидкий кислород может быть привозным, как это предлагается в [62], или производиться на месте его потребления. Еще более заманчивой для пиковой МГД-установки является возможность работы ее на продуктах сгорания водорода в кислороде с конденсацией водяного пара в конце цикла для исключения загрязнения атмосферы присадкой [64]. Для примера можно указать, что при продолжительности работы 300 часов в год стоимость электроэнергии составит около 8 коп/кВт·час [64].

Для покрытия полупиковых нагрузок были предложены схемы с обогащением воздуха кислородом, подогревом его в регенеративном подогревателе с дальнейшей утилизацией тепла в упрощенных паро- или воздушно-турбинных установках [63, 64]. К.п.д. таких установок может достигать 30%.

Плазменные МГД-установки замкнутого цикла

МГД-генераторы замкнутого цикла, использующие обычно в качестве рабочего тела инертные газы с присадкой легкоионизирующего металла, представляются наиболее приемлемыми при применении ядерного реактора в качестве источника тепла. Принципиально возможны и другие схемы, например, использование регенеративного керамического теплообменника, попеременно нагреваемого продуктами сгорания природного топлива и охлаждаемого инертным газом [65].

Работы, представленные на Мюнхенский симпозиум, показывают, что во всех аспектах проблемы создания МГД-установок замкнутого цикла произошли качественные сдвиги. Это связано не только с появлением новых экспериментальных результатов, таких как демонстрация удовлетворительной работы генератора с неравновесной плазмой под нагрузкой [66, 67], но и с более глубоким пониманием природы тех процессов, которые уже были известны ранее, но казались чрезвычайно сложными и существенно ограничивающими возможности систем замкнутого цикла (неустойчивость плазмы, утечки и т. п.).

1. Физические исследования. По-прежнему велись усиленные исследования турбулентной проводимости плазмы в магнитном поле [68—70]. Впервые количественно решена задача об эффективном сопротивлении и других параметрах плазмы с развитой турбулентностью, найден спектр этой турбулентности, существенно отличающейся по своей природе и по проявлениям от обычной гидродинамической турбулентности; на базе нелинейных представлений сделана попытка объяснения явления «магнитной контракции» — шнуrowания плазмы вдоль направления среднего тока [68].

Выполнены теоретические расчеты [69] амплитуды регулярных ионизационных страт, находящиеся в хорошем согласии с измерениями. «Численный эксперимент» по анализу развития ионизационной неустойчивости [70] привел к характерной структуре плазмы типа шнуров с перемычками, что близко к реально наблюдавшейся [71] физической картине, а также качественно соответствует результатам [68]. Другой подход к теоретическому исследованию структуры неравновесной плазмы в канале МГД-генератора фарадеевского типа с секционированными электродами развит в работах [72, 73]. Методом характеристик найдено двумерное распределение тока и потенциала в канале, расчетным путем выявлена возможность разрушения «магнитной контракции» тока и указаны соответствующие граничные условия (тонкое секционирование).

Большим достижением в области физического эксперимента с неравновесной плазмой, значение которого для практических целей, однако, сейчас еще трудно оценить, является получение большого значения эффективного параметра Холла ($\beta = 5$ при эффективной электропроводности 20 $мо/м$) путем полной ионизации малого количества присадки в аргон-цезиевой плазме при умеренном отрыве температуры электронов от температуры газа [74].

По-видимому, необходимо дальнейшее развитие работ в этом направлении, в том числе с использованием других рабочих тел, поскольку, например, в случае смеси гелия с цезием представляется, что диапазон параметров, при которых возможно достижение квазиустойчивой плазмы, шире, чем в случае аргон-цезиевой плазмы.

Все другие способы, направленные на уменьшение влияния ионизационной неустойчивости, например за счет введения молекулярной присадки [75], составляющей тока вдоль магнитного поля [76], применения специальных экранов из вольфрамовой проволоки [77] и прочие, пока не привели к определенным результатам. Новые эксперименты [66, 67, 71], как и в [2], показывают, что эффективный параметр Хол-

ла близок к единице при больших значениях β , а эффективная электропроводность $\sigma_{эф}$ может быть с равным успехом вычислена либо по эмпирической формуле [78] типа

$$\sigma_{эф} / \sigma = \beta_{кр} / \beta,$$

где $\beta_{кр}$ — критическое значение параметра Холла (~ 2), либо на основе нелинейного анализа модели плоских волн ионизационной неустойчивости [79, 80].

Не ослабевает интерес к исследованию баланса энергии электронов в неравновесной плазме. Детальные расчеты влияния метастабильных молекул азота на процесс рекомбинации аргон-цезиевой плазмы [74] показали, что время рекомбинации при добавлении азота заметно не увеличивается, что не позволяет надеяться на осуществление МГД-генератора с «замороженной» неравновесной проводимостью. Теоретические и экспериментальные исследования влияния добавки CO_2 на плазму He — Cs и Ar — Cs при температурах газа до $1900^\circ K$ и разных электронных температурах [81] показали, что при достаточно больших электронных концентрациях (10^{13} — 10^{14} см^{-3}) резко падает величина неупругих потерь энергии электронов на возбуждение колебательных молекулярных уровней в связи с установлением равновесия между этими уровнями и электронным ансамблем. Таким образом, опасения относительно пагубного влияния малых добавок молекулярных газов на неравновесную температуру электронов, по крайней мере, при больших концентрациях электронов не подтвердились.

Развитие ионизации на входе в канал оказалось сильно зависящим от технологии изготовления канала. В последних экспериментах [66] удалось достичь одинаковой плотности тока в канале как с предьонизатором, так и без него, хотя в последнем случае длина релаксации возрастала. Численное исследование влияния попеременного магнитного поля на релаксацию неравновесной проводимости, выполнявшееся в последнее время [82], нельзя считать завершенным. В этом направлении требуются дальнейшие исследования.

2. Экспериментальные исследования работы МГД-генератора. Впервые было общено об убедительных экспериментальных результатах, свидетельствующих о том, что МГД-генератор на неравновесной плазме при пересчете на крупную установку (с тепловой мощностью порядка 1000 Мвт) может иметь показатели, приемлемые для больших электростанций.

Основные характеристики установок, обсуждавшихся на конференции, приведены в табл. 2. Фотографии некоторых из этих установок приведены на рис. 8—10.

Практически все экспериментальные установки, работающие в длительном или квазипульсном режиме с горячими стенками, прошли через трудности, связанные с утечками тока. Как теперь известно, эти утечки резко снижают холловское напряжение, реализуемую электронную температуру и сильно увеличивают длину ионизационной релаксации. Усилия, направленные на улучшение изоляции, в конечном счете увенчались успехом. В последнее время в ряде работ получено фарадеевское напряжение холостого хода, близкое к расчетной величине, и весьма высокое холловское напряжение.

В относительно крупномасштабных опытах с МГД-генератором на основе ударной трубы, выполненных в «Дженерал электрик», США, получена электрическая мощность 400 кВт [85], что составило 9% энтальпии потока. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими представлениями в рамках модели турбулентной плазмы.

Приэлектродные потери до сих пор не вызвали особого внимания, поскольку влияние приэлектродных потерь должно уменьшаться при увеличении размера канала. Экспериментальные результаты показывают, что порядок величины приэлектродных потерь составляет $20 \div 100 \%$. Это является сопоставимой величиной с полным индуцируемым напряжением, получаемым в относительно малых установках, существующих в настоящее время. Поэтому для предсказания характеристик крупных установок на основе современных экспериментов необходимо лучше понимать приэлектродные потери, тесно связанные с вопросами организации течения в канале, распределением электрических полей и структурой протекания токов.

Более ясными представляются процессы вблизи стенок, связанные с секционированием электродов. Концентрация тока на границах электродов с ростом магнитного поля достигает насыщения. В связи с этим, а также в результате стремления эффективного параметра Холла к единице, осевые утечки тока уменьшаются с развитием ионизационной турбулентности плазмы. При сверхзвуковых скоростях напряженность холловского поля может достигнуть нескольких сотен вольт на сантиметр, что может вызвать существенные осевые утечки тока даже при весьма тонком секционировании. По-видимому, понадобятся какие-то методы локального снижения электронной температуры вблизи стенок. Впрыск молекулярных газов на изоляционной части электродных стенок, обсуждавшийся в [75, 86], возможно приведет к снижению электропроводности вблизи стенок, и, таким образом, к уменьшению осевых утечек.

В заключение можно сказать, что на основе накопленного экспериментального опыта в настоящее время представляется технологически возможным обеспечение необходимого качества изоляции канала для обеспечения высокой эффективности работы МГД-генератора на неравновесной плазме.

Таблица 2

Основные характеристики МГД-генератора замкнутого цикла на неравновесной плазме (канал фаррадеевский)

№№	Страна, схема установки	Литература	Материал изоляции канала, число электродных пар	Время работы	Рабочее тело	$T_0, ^\circ\text{K}; P_0, \text{ат}$	$P_T, \text{Мет}$	$V, \text{тл}$	V_{xx}/UBd	$\beta_{эф}$	$\sigma_{эф}, \text{мо/м}$	M	$E_x, \text{в/м}$	$P_{эл}, \text{квт}$	$P_{эл}^V, \text{Мет/м}^3$
1	СССР	71	10	150 мксек	Ag + Cs	1000 2	0,1	2,5	1	1,5	180÷220	1,5	—	—	20—100
2	ФРГ, замкн. контур	83	Окись алюминия, горячие стенки, 33	длит.	Ag + 0,1% K	2000 1,2	0,08	5	1	1,2	40	0,5	4000	—	40
3	ФРГ, замкн. контур	84	Окись алюминия, горячие стенки, 98	длит.	Ag + Cs He + Cs	1870 4	4	4	0,75	1,2	4	0,72	800	—	—
4	Италия	66,67	Окись алюминия, горячие стенки, 30	8 сек	He + 0,3% Cs	1740 1,1	0,52	3,8	1	1	3	0,7	2800	6,0	18 с коэфф. нагр. 0,4
5	США	85	Подогрев стенок до 1600° K, 37	5 мсек	Ag+0,8% Cs	2000 2,5	6	1,4	1	2	30	1,7	750	360	11
6	США	86,87	144	10 сек	He+0,3% Cs	2000 3,5	4	1,4	1	1	—	2,0	1500	8,0	7
7	США, замкн. контур	88	28	длит.	Ag + Cs	2000 2,3	1,5	1,0	0,8	—	—	0,35	150	—	—
8	Канада	89	—	сек	Ag + Na, K He + Cs	2000 8	3,6	1,7	—	—	—	0,8	—	—	—
9	Англия, замкн. контур	90	—	длит.	He + Cs	2000 1	—	2,0	—	—	—	—	—	—	—
10	Нидерланды (рис. 9)	—	—	5 мсек	Ag + Cs	2000÷ ÷2500 2	5—7,5	3	—	—	—	1,5÷2	—	—	—

Как видно из табл. 2, достигнутый на сегодня уровень абсолютной мощности велик, однако полученная плотность мощности $10 \div 100 \text{ Мвт/м}^3$ вполне соответствует требованиям к крупным энергетическим установкам. Максимальное преобразование энтальпии потока в электроэнергию (коэффициент преобразования) пока достигнуто в установках на основе ударных труб и составляет около 10% [71, 85]. Причем, как следует из работы [85], существенная доля энергии терялась на электродах, что

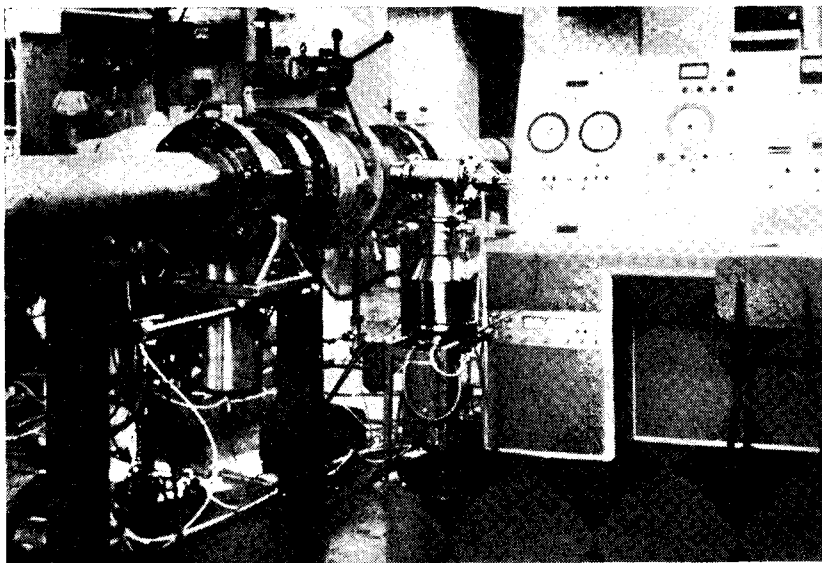


Рис. 9. МГД-установка с ударной трубой, Эйндховен, Нидерланды

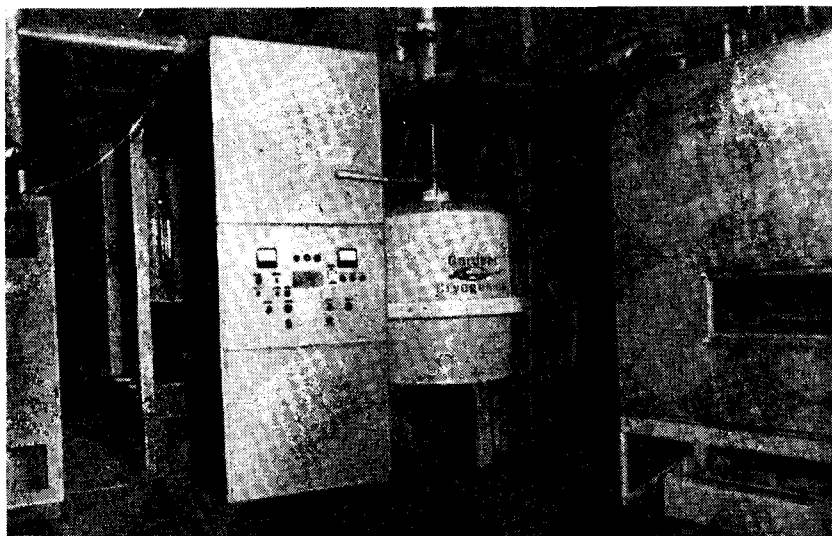


Рис. 10. Сверхпроводящий магнит и криогенные емкости МГД-установки замкнутого цикла в Юлихе, ФРГ

позволяет говорить о возможности извлечения 15—20% энтальпии и получения так называемого режима сильного торможения. Однако этот вопрос еще не ясен и требует проведения широких экспериментальных исследований на достаточно крупных установках.

Существующая на сегодня теоретическая модель МГД-генератора, учитывающая известные потери, удовлетворительно описывает экспериментальные результаты, полученные на установках относительно малого масштаба [66, 67]. На основе этой теории можно предсказать характеристики достаточно крупных установок. В табл. 3

[91] приведены результаты таких вычислений. Как видно, увеличение магнитного поля до 40 тл и тепловой мощности до 6000 Мвт позволяет достичь изоэнтروпического к.п.д. генератора порядка 70% при плотностях мощности, уже полученных на сегодня (около 50 Мвт/м³).

3. Технико-экономические аспекты. К настоящему времени выполнены работы, позволяющие с достаточной степенью достоверности предсказать экономические перспективы применения установок с МГД-генератором замкнутого цикла [92—95].

Таблица 3

Влияние масштаба установки на характеристики МГД-генератора замкнутого цикла (рабочее тело He + Cs)

Масштаб генератора	V , тл	Расход, кг/сек	P_T , Мвт	$P_{эл}$, Мвт	$P_{эл}^V$, Мвт/м ³	Коефф. преобразования	Изоэнтропный к.п.д. генератора, %	К.п.д. цикла, %
Малый	5	0,5	5	1,6	220	0,32	53	—
Средний	10	50	500	180	180	0,36	68	44
Большой	10	600	6000	2200	55	0,36	72	54

В большинстве работ за критерий оптимальности МГД-канала принимается постоянство электронной температуры и постоянство числа Маха. Подобные предположения значительно уменьшают трудности вычислений и дают результаты, согласующиеся с гораздо более общими и сложными в математическом отношении работами [96, 97].

Типичные результаты работ, посвященных анализу цикла, приведены в табл. 4. Эта таблица составлена на основе анализа, выполненного в Италии, СССР, США.

Особый интерес представляет работа [99], в которой обсуждается схема развязки реактора и МГД-генератора по давлению. Предполагается за реактором использовать регенеративный теплообменник типа каупера с попеременным пропусканием через него горячего газа высокого давления из реактора, а затем газа низкого давления, направляемого в канал генератора. Избыточное давление газа срабатывает в газовой турбине.

Другие работы основаны на традиционной схеме, в которой МГД-генератор является надстройкой к паротурбинной установке. Как видно из табл. 4, результаты различных расчетов как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых генераторов достаточно близки и показывают, что при использовании в качестве рабочего тела как гелия, так и аргона, достигим полный к.п.д. более 50%.

Несмотря на то, что на современном этапе развития технологии создания МГД-генераторов нельзя требовать абсолютно надежной экономической оценки, в некоторых работах рассматриваются экономические аспекты ядерных МГД-электростанций в сравнении с газотурбинными установками будущего и существующими паротурбинными циклами. Результаты нельзя считать окончательными, так как МГД-генератор и газовая турбина являются объектами, для которых нет достаточно точных данных об их работоспособности, капитальных затратах и надежности. Обе системы обладают довольно интересными потенциальными возможностями при высоких температурах с той лишь разницей, что в случае МГД-генератора сомнения таятся в источнике тепла, а в случае газовой турбины — в самой турбине.

Стоимость собственно МГД-установки оценивается в [100] в 16 долл/квт. В эту стоимость входят: канал, сверхпроводящий магнит с криогенным циклом и преобразователи постоянного тока в переменный. Основная доля затрат связана со стоимостью сверхпроводящего магнита, основанной на предполагаемой стоимости, составляющей половину сегодняшней.

В табл. 5 суммированы результаты работ [98] и [100].

Жидкометаллические МГД-установки замкнутого цикла

В наиболее чистом виде идея жидкометаллической МГД-установки предполагает, что в собственно МГД-генераторе работает струя жидкого металла, механическая энергия которой преобразовывается в электрическую. В этом случае МГД-установка должна включать еще одно устройство, где бы эта механическая энергия получалась из тепловой. Работы предыдущих лет показали, что эффективность такого рода устройств (инжекторов и сепараторов) невелика, в результате чего по расчетам полный к.п.д. жидкометаллической МГД-установки в приемлемом интервале температур должен оказаться в лучшем случае равным 7—8%. Даже подкупающая простота жидкометаллической МГД-установки при столь низком к.п.д. вряд ли сможет открыть

Проектные показатели атомной электростанции с МГД-генератором

Литература	[94]	[93]	[98]	[98]	[95]
Характеристики					
Тип цикла	МГД-надстройка к газотурбинной установке	МГД-генератор с газовой турбиной и регенеративным теплообменником	МГД-надстройка к газотурбинной установке	МГД-надстройка к газотурбинной установке	МГД-надстройка к газотурбинной установке
Рабочее тело	Гелий + 0,5% цезия	Гелий + 0,5% цезия	Аргон + 0,1% цезия	Гелий + цезий	Гелий + цезий
Максимальная температура торможения, °К	2000	2000	1973	1973	2000
Максимальное давление торможения, ат	10	50	30	10	—
Тепловая мощность потока, Мвт	6000	3200	—	—	2000
Магнитное поле, тл	10	10	8	8	—
Число Маха	0,9	0,9	2,0	2,0	—
Длина канала, м	11,1	—	5,0	5,0	—
Коэффициент расширения в генераторе	5,8	6,0	5,0	5,0	—
Изоэнтropicский к.п.д. генератора, %	72	62	77	70	70
Средняя объемная плотность мощности, Мвт/м ³	55	50	—	—	—
Тепловая мощность ядерного реактора, Мвт	2500	—	—	—	—
Объемная плотность мощности ядерного реактора, Мвт/м ³	4,6	—	—	—	—
Коэффициент полных потерь давления	1,35	1,29	1,3	1,3	—
Электрическая мощность МГД-генератора, Мвт	2188	—	1200	1200	—
Электрическая мощность турбины, Мвт	473	—	Равна мощности компрессора	Равна мощности компрессора	—
Затраты мощности на сжатие газа, Мвт	1320	—	Равна мощности турбины	Равна мощности турбины	—
Чистый выход электроэнергии, Мвт	1340	—	1200	1200	—
Полный к.п.д. установки, %	54	51	53,5	50	50

Таблица 5

Сравнительные экономические характеристики электростанций

Литература	[98]			[100]			
	1200	1600	1200		1000	1000	1000
Тип электростанции	Высокотемпературный газозохлаждаемый реактор + газ. турбина	Высокотемпературный газозохлаждаемый реактор + МГДГ	Водородной реактор + паровая турбина		Высокотемпературный газозохлаждаемый реактор + газ. турбина	Высокотемпературный газозохлаждаемый реактор + МГДГ	Водородной реактор + паровая турбина
Полный к.п.д. цикла, %	50	53		%	46,3	50	
Полные капиталовложения, руб/квт	79	90	88	Марка/квт	494	521	564
Амортизационная стоимость	—	—	—	Пфенниг/квт·час	1,062	1,126	1,219
Стоимость топлива, коп/квт·час	0,12	0,10	—	Пфенниг/квт·час	0,407	0,377	0,680
Эксплуатационная стоимость	—	—	—	Пфенниг/квт·час	0,160	0,160	0,160
Себестоимость электроэнергии, коп/квт·час	0,25	0,24	0,68	Пфенниг/квт·час	1,64	1,66	2,06

ей дорогу в большую энергетику. Поэтому при анализе возможных приложений жидкометаллических МГД-установок такого типа на первый план выдвигаются установки специального назначения, например, для космической энергетики, где простота установок и некоторые другие ее качества оказываются решающими.

Работы прошедших лет наряду с выяснением принципиальных возможностей таких установок, углубленным изучением протекающих в них процессов, были направлены на создание комплексных установок. Большим успехом явился пуск в Советском Союзе жидкометаллической МГД-установки с инжекторным разгонным устройством с расчетной мощностью в 1 *квт* [101]. Близка к завершению опытно-промышленная установка с инжекторным разгонным устройством с проектной тепловой мощностью в 1000 *квт*, создаваемая в Западном Берлине [102]. Ведутся эксперименты на модельной установке с сепарационным разгонным устройством в Лаборатории реактивного движения США [103].

Технико-экономические расчеты для выяснения перспектив жидкометаллических МГД-установок совершенствуются по мере накопления знаний об особенностях их работы. Но уже сейчас можно сказать, что применение МГД-надстройки к обычной паротурбинной станции, использующей природное топливо, может оказаться экономически выгодным.

Наряду с упомянутыми выше МГД-установками с различными электро- и термодинамическими рабочими телами в последнее время в ряде стран и прежде всего в США и Франции начали интенсивно разрабатываться установки с двухфазным газо-жидкометаллическим рабочим телом, которое при определенных условиях обладает и сжимаемостью, и достаточной электропроводностью. В этом случае отпадает нужда в разгонном устройстве и, следовательно, к.п.д. установки может быть повышен. Правда, это достигается ценой снижения электропроводности, что, по-видимому, сделает нецелесообразным создание генератора переменного тока. Некоторым усложнением установки является также необходимость в газовом компрессоре и в регенеративных теплообменниках. Тем не менее такие установки при приемлемых температурных условиях (верхняя температура цикла порядка 1000° С) могут по расчетам иметь полный к.п.д. до 50% и тем самым непосредственно использоваться в большой энергетике [104, 105]. Ведущиеся в настоящее время экспериментальные и теоретические исследования должны дать материал для проверки обоснованности этого оптимизма.

Несколько особняком стоят жидкометаллические схемы с так называемыми поршневыми генераторами. Здесь используются также два рабочих тела — газ и жидкий металл, но не мелкодиспергированные как в случае двухфазных генераторов, а собранные в достаточно крупные дискретные объемы. Такие схемы разрабатываются в США и Советском Союзе, однако степень их разработанности пока недостаточна для того, чтобы высказать суждение о возможных областях применения этих установок.

1. Двухфазные сопла и разгонные устройства. Двухфазные сопла являются неотъемлемой частью разгонных устройств МГД-установок сепарационного и инжекторного типов. Есть сведения, что одна из причин расхождения между расчетными и экспериментальными характеристиками разгонных устройств кроется в неправильных оценках к.п.д. двухфазных сопел. Специфика двухфазных сопел, применяемых в МГД-установках состоит в том, что они должны работать с очень большими относительными содержаниями жидкости. В ряде случаев представляет интерес истечение из сопла насыщенной или даже недогретой до насыщения жидкости. Такие течения ранее были изучены недостаточно, отсутствовала и их теория. Поэтому с первых же шагов в области жидкометаллических МГД-установок проблеме двухфазных сопел уделялось большое внимание. За время, прошедшее с Варшавской конференции в понимании двухфазных сопловых течений достигнут определенный прогресс.

Существенно, что в работах последних лет впервые получены результаты экспериментальных исследований сопел, работающих на металлическом паре [106]. Эти результаты еще далеки от совершенства, но позволяют заключить, что истечение металлического пара происходит, во многом, подобно истечению водяного пара.

Непрерывно уточняются и совершенствуются наши представления о процессах в инжекторном разгонном устройстве. В связи с этим было предпринято систематическое изучение вопросов запуска инжектора, во многом прояснившее механизм процессов, сопутствующих запуску, и предложен ряд методов, облегчающих запуск инжектора с малым горлом диффузора [107].

По-видимому, произошло некоторое изменение в оценках эффективности сепарационных разгонных устройств. В экспериментах, проведенных в последнее время в США, проводимость потока в канале генератора была более чем в два раза ниже ожидавшейся. Одна из возможных причин этого — неполная сепарация газа в сепараторе. Дальнейшие эксперименты должны показать, является ли это неизбежным и следует ли при использовании сепарационного разгонного устройства ориентироваться, по существу, на двухфазный генератор.

2. МГД-генераторы на жидком металле отличаются от обычных электродинамических генераторов рядом принципиальных особенностей. К числу этих особенностей относятся отличие профиля скорости потока жидкого металла от прямоугольного,

наличие входных и выходных по отношению к магнитному полю участков потока металла, влияние потерь на трение, существенно большая величина магнитного зазора, а также в большинстве случаев наличие проводящих стенок канала, шунтирующих поток жидкого металла.

Большинство теоретических и экспериментальных работ в области жидкометаллических МГД-генераторов посвящено исследованию именно этих особенностей и выяснению условий, при которых эффективность МГД-генератора окажется максимальной. Как уже отмечалось, одно из преимуществ жидкометаллических МГД-установок состоит в том, что они допускают создание индукционных генераторов переменного тока. Такие генераторы удобны, так как могут давать электрический ток с необходимыми параметрами и не требуют инвертирования. Поэтому наибольшее число работ посвящено исследованию именно этого типа генераторов. К сожалению, теория индукционных жидкометаллических генераторов в силу большой сложности протекающих в них процессов требует использования ряда упрощений и не дает возможности рассчитать и оптимизировать такие генераторы, не прибегая к эксперименту. В связи с этим нет уверенности в том, насколько близко удастся подойти к предсказываемым упрощенными теориями значениям к.п.д. индукционных генераторов. Работы последних лет, посвященные индукционным генераторам, представляют собой дальнейшие попытки привести в соответствие теорию и эксперимент и выбрать оптимальный тип генератора, обеспечивающий наибольший к.п.д.

Теорию кондукционных генераторов постоянного тока в последнее время удалось довести до хорошего соответствия с экспериментом, что позволяет в определенной области параметров достаточно уверенно рассчитывать такие генераторы [108].

3. Двухфазные генераторы. Трудности создания эффективного разгонного устройства привели к тому, что ряд исследователей занялся проблемой создания рабочего тела, обладающего одновременно и сжимаемостью, и достаточной электропроводностью. Таким рабочим телом, в частности, является эмульсия (пена), образованная из жидкого металла с включенными в него пузырьками газа.

Естественно, что такая эмульсия обладает электропроводностью меньшей, чем исходный жидкий металл. Однако при объемном газосодержании, не превосходящем примерно 80%, система сохраняет пузырьковую структуру и имеет электропроводность, все еще близкую к металлической. При использовании регенеративного теплообменника термический к.п.д. цикла такой установки (цикл, близкий к циклу Эриксона) может оказаться достаточно близким к.п.д. цикла Карно, осуществяемого в том же интервале температур. Таким образом, если внутренний относительный к.п.д. собственно генератора и компрессора окажется достаточно большим, можно ожидать большого значения полного к.п.д. всей установки. С учетом сравнительно невысокой электропроводности эмульсии двухфазный генератор, по-видимому, придется выполнять в виде генератора постоянного тока. Во Франции и США уже проведен достаточно большой объем экспериментальных и теоретических исследований двухфазного генератора [109].

Несмотря на прогресс, достигнутый в области двухфазных генераторов, вопросы о реально достижимых значениях к.п.д. и о возможности осуществления достаточно крупных генераторов, все еще остаются открытыми.

Оценивая перспективы установок с двухфазными генераторами, следует иметь в виду, что если надежды на достаточно высокие значения к.п.д. оправдаются, они могут рассматриваться как самостоятельные базовые энергетические установки. В качестве источника тепла для них наиболее интересен ядерный реактор с жидкометаллическим или газовым охлаждением. Наряду с этим МГД-установки с двухфазным генератором можно будет использовать в качестве надстройки к газотурбинному циклу, причем турбина в этом случае удобно комбинируется с компрессором.

4. Циклы, схемы и экономика. Количество работ, посвященных циклам и схемам жидкометаллических МГД-установок с сепарационными и инжекторными разгонными устройствами в последние годы уменьшилось. В то же время в области установок с двухфазным генератором работы по схемам и циклам продолжают, поскольку еще не все их возможности, в частности для большой энергетики, были ранее выявлены. В частности, в последних работах показано, что жидкометаллические установки с двухфазным генератором могут оказаться перспективными не только в сочетании с реакторами, охлаждаемыми жидкими металлами, но и в сочетании с газоохлаждаемыми реакторами. Поскольку оба эти типа реакторов являются основными для реакторов на быстрых нейтронах, становится ясным интерес, который могут представить рассматриваемые МГД-установки. В случае использования газоохлаждаемых реакторов представляют интерес также схемы, в которых двухфазный жидкометаллический МГД-генератор включен перед газовой турбиной, используемой для привода компрессора. В этом случае предполагается, что МГД-генератор будет работать с начальной температурой 1500° К, а газовая турбина лишь 1100° К. Следует подчеркнуть, что обе температуры достижимы уже даже с точки зрения сегодняшней технологии. Работы по исследованию МГД-генераторов с жидкометаллическими поршнями ведутся пока замедленными темпами. Таким установкам свойственны трудности, характерные для обычных поршневых машин, связанные прежде всего с невысокими значениями удельной объемной мощности. Однако отсутствие кривошипного механизма позволяет в принципе повысить скорость дви-

жения поршня и, следовательно, удельную мощность. Одной из дополнительных трудностей при создании таких установок является необходимость обеспечения устойчивости жидкометаллического поршня.

Таким образом, эффективность различных типов жидкометаллических МГД-установок сегодня можно оценить следующим образом.

Простейшие схемы инжекторных и сепарационных МГД-установок по сегодняшним оценкам смогут иметь полный к.п.д. 6—8% при начальной температуре цикла 1100 и конечной 600° С. Большим преимуществом таких установок является их простота. При использовании этих установок в качестве надстроек на обычных паротурбинных станциях, имеющих к.п.д. 40%, полный к.п.д. поднимется до 45%. К.п.д. усложненных схем, включающих многоступенчатость, регенерацию и т. п. в том же интервале температур оценивается в 12—14%.

Схемы с двухфазным генератором при начальной температуре цикла 1200° С и развитой регенерации имеют расчетное значение полного к.п.д. около 50%.

Вопрос о возможной стоимости жидкометаллических МГД-установок все еще остается открытым.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступил в редакцию
18 I 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Status report on MHD Electrical Power Generation, IAEA/ENEA, International Liaison Group on MHD Electrical Power Generation, Vienna, 1967.
2. MHD Electrical Power Generation, The 1969 status report, Joint ENEA/IAEA, International Liaison Group on MHD Electrical Power Generation, 1969.
3. Fifth International Conference on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Munich, 1971.
4. R. Bünde, H. Muntenbruck, J. Raeder, G. Zanke, G. P. Hanselmann, R. Zeller, R. Wienecke, см. 3, 1, 229.
5. Th. Bohn, K. Grawatsch, Chr. Holzapfel, G. Kolb, W.-D. Kühne, H. Lang, C. Noack, P. Schabel, см. 3, 1, 243.
6. K. Fushimi, T. Homma, S. Ikeda, K. Onda, K. Takano, Y. Kusaka, H. Kosaka, M. Fuluyama, Y. Kaga, T. Shikakura, K. Kato, M. Amano, см. 3, 1, 187.
7. K. Fushimi, T. Homma, S. Korenaga, T. Okuo, S. Nagata, T. Masuda, T. Shimada, T. Honda, H. Takazawa, T. Hashimoto, T. Agawa, K. Takura, T. Kajikawa, T. Kashihara, O. Nomura, Y. Kusaka, F. Nakajima, см. 3, 1, 371.
8. W. Brzozowski, Z. Celinski, J. Dul, E. Fuksiewicz, T. Kozlowski, A. Mokwinski, M. Plata, Z. Rybacki, см. 3, 1, 151.
9. Y. C. L. Wu, L. Crawford, R. Shanklin, J. Muehlhauser, D. Molnar, J. B. Dicks, см. 3, 1, 213.
10. O. K. Sonju, J. Teno, см. 3, 1, 199.
11. И. Т. Швец, А. Н. Милых, Э. П. Страшинин, Г. А. Клименко, Н. И. Мазур, Р. В. Ганефельд, М. М. Нехалин, см. 3, 1, 171.
12. Д. Г. Жимерин, В. А. Башилов, Ю. В. Макаров, В. П. Мотулевич, см. 3, 1, 249.
13. В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин, Б. Я. Шумяцкий, В. В. Кириллов, Д. К. Буренков, С. И. Пищиков, Г. А. Любимов, И. Л. Мостинский, П. Г. Полетаевкин, В. И. Раховский, см. 3, 1, 353.
14. В. А. Кириллин, П. С. Непорожний, А. Е. Шейндлин. VII МИРЭК, 20—24 августа 1968, Москва С4-72.
15. J. E. Klepeis, J. F. Louis. Proc. 10-th Symp. on Eng. Asp. of MHD, Cambridge, 1969, 202.
16. А. Б. Ватажин, Г. А. Любимов, С. А. Регирер. Магнитогиродинамические течения в каналах. «Наука», 1970.
17. Z. N. Celinski, см. 3, 1, 79.
18. А. Б. Ватажин, А. В. Готовцев, Ю. П. Емец, С. А. Регирер, А. Е. Якубенко, см. 3, 1, 127.
19. G. S. Argyropoulos, M. A. Casteel, S. T. Demetriades, см. 15, 29.
20. Y. C. L. Wu, J. F. Martin. Proc. 11-th Symp. on Eng. Asp. of MHD, Pasadena, 1970, 128.
21. А. Е. Бузников, В. Е. Ванин, В. В. Кириллов, Ю. Н. Соколов, см. 3, 1, 225.
22. R. H. Eustis, R. Kessler, см. 3, 1, 281.
23. J. K. Koester, J. W. Stephens, J. F. Martin, M. K. Nickolson, см. 3, 1, 265.
24. Y. C. L. Wu, D. L. Denzel, R. E. Taylor, E. S. Jett, J. B. Dicks, см. 15, 23.
25. R. H. Eustis, R. M. Cima, K. E. Berry, см. 20, 119.
26. А. В. Губарев, Л. М. Дегтярев, А. А. Самарский, А. П. Фаворский, Докл. АН СССР, 186, № 3, 1970.

27. P. Fritzer, см. 3, 1, 143.
28. D. E. Fussey, см. 3, 1, 113.
29. И. А. Васильева, И. М. Гапонов, В. В. Кириллов, Г. П. Малюжонк, А. П. Нефедов, Л. П. Побережский, см. 3, 1, 27.
30. J. B. Dicks, Y. C. L. Wu, M. H. Scott, E. M. Murray, см. 3, 1, 67.
31. J. Teno, C. Liu, T. R. Brogan, см. 15, 15.
32. Г. В. Самсонов, В. М. Слепцов, Г. Г. Гнесин, В. С. Фоменко, И. А. Подчерняева, Ю. К. Лапшов, Г. М. Щеголев, Ю. П. Кукота, Э. П. Страшинин, см. 3, 1, 395.
33. Ю. П. Кукота, В. К. Осадчий, Г. М. Щеголев, см. 3, 1, 411.
34. V. A. Bityurin, A. E. Buznikov, V. E. Vanin, V. V. Kirillov, V. I. Kovbasyuk, G. A. Lyubimov, S. A. Medin, Yu. N. Sokolov. Energy conversion, 10, № 2, 1970, 143—147.
35. O. K. Sonju, J. Teno, T. R. Brogan, см. 20, 5.
36. J. C. Cutting, R. H. Eustis, см. 3, 1, 289.
37. Я. Лицкий, Ш. Сувер. Теплофизика высоких температур, 8, № 3, 1970.
38. J. Ferdinand, J. Krasik, J. Lego, см. 3, 1, 57.
39. Ю. Г. Чернов. Теплофизика высоких температур, 8, № 5, 1970.
40. Y. Mori, K. Ohtake, K. Ogasawara, см. 3, 1, 11.
41. P. E. English, T. D. Rantell, J. Brit. Appl. Phys., Ser. 2, 2, № 9, 1969.
42. Н. А. Синайский, И. А. Яворский, Ю. М. Волков, см. 3, 1, 43.
43. B. Kessler, R. H. Eustis, Proc. 9-th Symp. on Eng. Asp. of MHD, Tennessee, 1968.
44. Ю. М. Зеликсон, В. В. Кириллов, Е. П. Решетов, Б. Д. Флид. Теплофизика высоких температур, 8, № 1, 1970.
45. H. Ogiwara, K. Mawatari, M. Kato, T. Tamaoki, см. 3, 1, 324.
46. В. Е. Ванин, В. В. Кириллов, Г. И. Масленников, Ю. Н. Соколов. В сб. МГД-метод получения электроэнергии (под ред. В. А. Кириллина и А. Е. Шейндлина). «Энергия», 1972.
47. В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин, Б. Я. Шумяцкий, В. В. Кириллов, Д. К. Буренков, С. И. Пищиков, П. Г. Полетавкин, И. Л. Мостинский, В. Н. Сухов, Л. В. Краузе. Теплофизика высоких температур, 9, № 5, 1971.
48. В. И. Залкинд, В. В. Кириллов, Ю. А. Ларионов, Н. С. Семенов. Журнал прикладной математики и технической физики, № 1, 1971.
49. J. B. Dicks, Y. C. L. Wu, D. L. Denzel, L. W. Crawford, J. Muehlhouser, P. Chang, R. V. Shanklin, V. Zitzow, см. 15, 183.
50. K. Mawatari, M. Kato, N. Inai, T. Tamaoki, см. 3, 1, 503.
51. Y. Mori, K. Hijikata, см. 3, 1, 545.
52. A. R. Kantrowitz, R. J. Rosa, W. Irving, см. 3, 1, 599.
53. T. Nakada, N. Nakamura, Y. Narita, T. Taira, см. 3, 1, 537.
54. T. Fukui, T. Kato, Y. Iizawa, A. Nagahiro, T. Imatake, S. Matsubara, M. Kinoshita, см. 3, 1, 521.
55. С. А. Тагер, Е. В. Самуйлов, И. Б. Рождественский, Р. Ю. Талумаа, Ф. М. Яхилевич, см. 3, 1, 474.
56. А. Е. Шейндлин, Б. Я. Шумяцкий, А. Г. Сокольский, Г. И. Россиевский, Г. М. Корягина, см. 15, 134.
57. Б. Я. Шумяцкий, А. Г. Сокольский, И. И. Перелетов. Теплофизика высоких температур, 7, № 4, 1969.
58. F. Hals, W. D. Jackson, см. 3, 1, 645.
59. А. Е. Шейндлин, Д. Г. Жимерин, В. П. Мотулевич, Б. Я. Шумяцкий, В. А. Башилов, В. И. Ковбасюк, VIII МИРЭК, 1971, Бухарест.
60. F. Hals, W. D. Jackson, см. 15, 136.
61. R. Rosa, J. Teno, S. W. Petty, A. Kantrowitz, см. 15, 129.
62. R. Rosa, F. Hals, J. Teno, S. Petty, W. Jackson, A. Kantrowitz, см. 20, 41.
63. A. E. Sheindlin, B. Ya. Shumyatskii, V. I. Kovbasyuk, E. M. Shelkov, L. P. Stolyar, см. 10, 1, 585.
64. Th. Bohn, G. Noack, см. 3, 1, 629.
65. J. P. Azalbert, R. Scaricabarozzi, C. Vavasseurand, P. Zettwoog. Symp. on MHD Electr. Power Gen., Warsaw, 1968, 2, 1213.
66. M. Gasparotto, P. Gay, R. Toschi, E. Bertolini, см. 3, 2, 415.
67. E. Anzidel, E. Bertolini, H. Gasparotto, P. Gay, R. Toschi, см. 3, 2, 47.
68. А. М. Дыхне, см. 3, 2, 247.
69. V. Badiadi, V. Zampaglione, см. 3, 2, 263.
70. Е. П. Валихов, Л. М. Дегтярев, А. П. Фаворский, см. 65, 2, 307.
71. М. М. Маликов, В. С. Голубев, А. В. Недоспасов, см. 3, 2, 371.
72. И. С. Глушков, В. Т. Карпухин, А. В. Недоспасов. Теплофизика высоких температур, 7, № 2, 1969.
73. L. L. Lendyuel, см. 3, 2, 207.
74. T. Nakamura, M. Riedmüller, см. 3, 2, 291.

75. J. L. Kerrebrock, J. S. Draper. AIAA 8-th Aerospace Sciences Meeting, N. Y., 1970.
 76. J. L. Kerrebrock, см. 20.
 77. R. H. Evans, J. F. Lonis, M. Mitchner, C. H. Kruger, см. 20.
 78. Е. П. Велихов, А. М. Дыхне, И. Я. Шипук. Труды VII Международного симпозиума по ионизационным явлениям в газах, Белград, 1965.
 79. A. Solbes, см. 65, 1, 499.
 80. V. Zampaglione, см. 65, 1, 593.
 81. J. S. Draper, J. L. Kerrebrock, см. 3, 2, 471.
 82. G. Kolb, см. 3, 2, 175.
 83. G. Brederlow, H. Zinko, K. J. Witte, см. 3, 2, 387.
 84. T. Bohn, K. Grawatsch, C. Holzapfel, P. Komarek, H. Lang, G. Noak, см. 3, 2, 403.
 85. B. Zauderer, T. Tate, см. 3, 2, 431.
 86. J. S. Draper, J. L. Kerrebrock, см. 3, 2, 427.
 87. J. L. Kerrebrock. Private communication, July, 1971.
 88. R. J. Sovie, L. D. Nichols. NASA TM X-2277, 1971.
 89. S. J. Townsend, см. 3.
 90. S. Dolby, M. G. Haines, L. R. McNab, см. 3.
 91. Б. Я. Шумяцкий, В. В. Кириллов, см. 3.
 92. Б. Я. Шумяцкий, В. И. Ковбасюк, А. П. Рогачев, Л. П. Столяр. Теплофизика высоких температур, 9, 170, 1971.
 93. E. Salpietro, R. Toschi, см. 3, 4, 63.
 94. E. Bertolini, M. A. Hoffman, см. 3, 2, 497.
 95. J. F. Louis. IAEA Liaison Group on MHD Power Generation, 1970.
 96. В. С. Воробьев, Б. И. Краснов. Теплофизика высоких температур, 9, 165, 1971.
 97. S. Bobbio, L. De Menna, O. Greco, E. Bertolini, см. 3, 2, 513.
 98. M. D. Millionschikov, A. M. Lyulka, A. V. Nedospasov, A. E. Sheindlin. IAEA Liaison Group on MHD Power Gen., 1970.
 99. G. R. Dalton, W. H. Ellis, K. Imani, см. 3, 2, 543.
 100. T. Bohn, K. Grawatsch, C. Holzapfel, G. Kolb, P. Komarek, H. Lang, G. Noak, P. Schabel, см. 20.
 101. I. T. Aladiev, S. V. Teplov, I. M. Tolmach, см. 3, 3, 161.
 102. R. Radebold, H. J. Deeg, J. Freund, B. Lehmann, V. Mickel, T. Schulz, H. P. Schafel, P. Stübing, K. H. Wagner, см. 3, 3, 195.
 103. D. J. Cerini, D. G. Elliott, см. 3, 3, 177.
 104. W. E. Amend, M. Petrick, см. 3, 3, 233.
 105. R. Bidard, J. Sterlini, см. 3, 3, 217.
 106. E. Klein, см. 3, 3, 21.
 107. S. I. Vainshtein, A. F. Gandelsman, A. P. Sevastianov, E. E. Shpilrain, K. A. Yakimovitch, V. S. Danilin, Y. F. Kalinin, G. V. Ciklaury, см. 3, 3, 147.
 108. G. A. Baranov, V. F. Vasilyev, V. A. Glukhikh, B. G. Karasev, I. R. Kirillov, I. V. Lavrentyev, см. 3, 3, 89.
 109. J. Sterlini, M. Trotignon, см. 3, 3, 193.
-