

При повторных вводах стационарный уровень достигался через 2—4 ч. Напряжение ячеек в очищенном натрии равнялось 1650—1850 мВ. Из-за контакта смоченной натрием керамики с воздухом при монтаже и термоударов ускорялось старение электролита и увеличивались напряжение и дрейф.

Расчетное значение концентрационного коэффициента для 400 °С [см. уравнение (3а)] составляет — 66,8 мВ. Для 22 ячеек значения K_C находились в диапазоне — 50 ÷ — 66 мВ, что соответствует 75—99% расчетного. Четыре ячейки имели низкие значения K_C , равные —25 ÷ —40 мВ. Снижения K_C ячеек в зависимости от времени эксплуатации в пределах точности экспериментов не отмечено. На рис. 2 приводится характер изменения напряжения ячейки при дозировании кислорода в контур. На рис. 3 даны градуировочные кривые ячеек при 400 °С. Вычисленные коэффициенты уравнения ячейки по результатам градуировки 22 ячеек при 400 °С с вероятностью 95% приводит к уравнению

$$U = (1767 \pm 133) - (56 \pm 9) \lg C_0, \text{ мВ}, \quad (4)$$

которое с учетом погрешностей определения концентрации кислорода находится в приемлемом соответствии с расчетным уравнением (2).

Расчетные значения температурного коэффициента для концентраций 1, 100 млн⁻¹ равны соответственно —0,12; —0,32 мВ/град, измеренные K_T в начале испытаний находились в пределах +0,3 ÷ —0,3 мВ/град. С увеличением времени испытаний температурные коэффициенты для большинства ячеек изменялись.

Быстродействие ячеек при дозировании кислорода составляло 1 мин; 67% сигнала для большинства ячеек достигалось через ~4 мин (см. рис. 2). Ячейки с низкими концентрационными коэффициентами имели замедленную реакцию при изменении концентрации кислорода. Ухудшения реакции ячеек в зависимости от времени эксплуатации не отмечено.

Было исследовано влияние водорода на показания ячеек. Изменение напряжения ячеек при дозировании водорода в натрий до 7 млн⁻¹ составило 1,5 мВ на 1 млн⁻¹ водорода при концентрации кислорода 1—100 млн⁻¹. Таким влиянием в обычных условиях эксплуатации контуров можно пренебречь. С помощью электрохимических ячеек исследовали равновесие реакции $O + H \rightleftharpoons OH$ в натрии. Полученные зависимости приведены в работе [8].

При облучении ячеек рентгеновским и γ -излучением наблюдалось обратимое снижение напряжения ячеек, пропорциональное мощности дозы и зависящее от внутреннего сопротивления ячеек. На ячейки внутренним сопротивлением $\leq 10^6$ Ом при 350—400 °С облучение дозой до 10 Р/с ($2,58 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг·с) практически не влияло. При облучении нейтронами и испытаниях в радиоактивном натрии БР-10 также не обнаружено влияния на показания ячеек [9].

Полученные характеристики ячеек позволяют с достаточной для практики точностью измерять активность кислорода в натрии. Конструкция ячеек соответствует требованиям промышленных установок. Для перехода к широкому внедрению необходимо добиться увеличения ресурса их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horsley G. Rep. AERE-R-3037, 1961.
2. McKee J. e.a. — Nucl. Technol., 1974, v. 24, p. 217.
3. Jung. J. — Nucl. Mater., 1975, v. 56, N 2, p. 213.
4. Roy P., Bugbee B. — Nucl. Technol., 1978, v. 39, p. 216.
5. Ullmann H., Reetz T., Teske K. — Kernenergie, 1973, Bd. 16, S. 291.
6. Noden J. — J. Brit. Nucl. Energy Soc., 1973, v. 12, N 3, p. 329.
7. Ullmann H. e.a. — Kernenergie, 1975, Bd. 18, S. 224.
8. Teske K. — Ibid, 1979, Bd. 22, S. 25.
9. Richter W. — Ibid, 1980, Bd. 23, S. 187.

Поступила в Редакцию 23.09.80

УДК 621.313.5.532

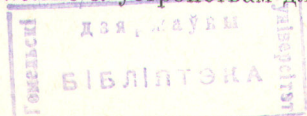
Регулирование расхода жидкометаллических теплоносителей

ВИТКОВСКИЙ И. В., ГЛУХИХ В. А., КИРИЛЛОВ И. Р., СМИРНОВ А. М.

Развитие ядерной энергетики с быстрыми реакторами ставит задачу создания принципиально новых устройств для регулирования расхода жидкометаллических рабочих сред (теплоносителей). В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты эксплуатации быстрых реакторов и экспериментальных стендов, связанные с регулированием расхода жидких металлов, сформулированы требования, предъявляемые к устройствам для

регулирования расхода, описан новый тип этих устройств — магнитогидродинамические (МГД) дроссели.

Жидкометаллические контуры АЭС с быстрыми реакторами представляют довольно сложную систему трубопроводов, имеющую параллельные ветви, элементы со свободными поверхностями жидкого металла и т. д. Перепады давления на параллельных ветвях установки не должны отличаться



более чем на $0,1 \cdot 10^5$ Па, а в установке со свободными поверхностями жидкого металла разность уровней не должна превышать примерно одного метра. Поэтому после монтажа и экспериментального определения гидравлической характеристики контура приходится выравнять сопротивления в параллельных ветвях дросселирующими устройствами, что увеличивает сроки, объем и стоимость пусконаладочных работ.

Весьма актуальными представляются вопросы дозирования (отбора проб) теплоносителя в секционированных парогенераторах, регулирования расхода теплоносителя в параллельных секциях, а также ветвях установки, предназначенных для работы в аварийных режимах. Такое регулирование позволяет как в номинальном, так и в аварийном режимах создавать требуемое распределение расхода теплоносителя по секциям и ветвям и тем самым повышать эффективность установки. В ряде случаев помимо указанных задач необходимо, например, обеспечить изменение расхода рабочей среды во времени по заданному закону, его стабилизацию и т. п.

Отметим основные требования к устройствам для регулирования расхода жидкого металла в промышленных и экспериментальных установках:

возможность плавного прецизионного регулирования расхода в трубопроводах практически любого диаметра;

малый коэффициент гидравлического сопротивления в положении «открыто»;

высокие быстродействие и стабильность характеристик;

высокая надежность и способность выдерживать аварийное давление, превышающее в десятки раз номинальное значение;

ресурс работы, равный сроку службы всей установки;

минимальные масса и габариты;

низкая стоимость.

До недавнего времени основными устройствами для регулирования расхода жидких металлов были механические вентили, во многом не удовлетворяющие названным выше требованиям. Коэффициенты гидравлических сопротивлений полностью открытых вентилях составляют 6—10, что приводит к значительным гидравлическим потерям мощности. Например, если рабочей средой является натрий, температура которого 400°C , то при скорости 5 м/с, потери давления в вентиле будут составлять $(0,6—1,0) \cdot 10^5$ Па. Время полного перехода от закрытого до открытого положения вентиля с электроприводом может достигать нескольких минут, а в ряде случаев по требованиям эксплуатации оно не должно превышать нескольких секунд. Из-за вибрации затворов, конструктивно связанных с сильфонными узлами, вентили не обеспечивают стабильности характеристик и плавности регулирования. Конструкция вентиля до-

статочно сложна, а трудоемкость их изготовления, а следовательно, и стоимость велики.

Дозирование (отбор проб) теплоносителя в системе аварийной защиты (САЗ) парогенераторов иногда осуществляется из разных секций с помощью механического селектора. Наличие сальниковых уплотнений и вращающихся частей является недостатком такого устройства, так как снижает его надежность и усложняет обслуживание.

В НИИЭФА им. Д. В. Ефремова в 1970 г. было предложено для регулирования расходов и дозирования рабочих сред в перечисленных выше случаях применять МГД-машины, получившие впоследствии названия МГД-дросселей и МГД-насосов-дросселей [1]. К настоящему времени проведены обширные теоретические и экспериментальные исследования таких машин [1—7], предложена методика их рационального выбора для регулирования расходов жидкометаллических теплоносителей на АЭС с быстрыми реакторами [8]. Заметим, что применение магнитного поля для регулирования расходов жидких металлов, известно также, например из работ [9, 10].

МГД-насосы-дроссели, по существу, являются МГД-насосами, предназначенными для работы в тормозном и двигательном (насосном) режимах [11]. Для торможения рабочих сред используется, как правило, режим противовключения. МГД-насосы-дроссели могут применяться в САЗ для отбора проб теплоносителя из каждой секции парогенератора. Отбор проб при этом осуществляют путем последовательного периодического переключения каждого дросселя из режима противовключения в режим прокачивания теплоносителя. В режиме противовключения дроссель препятствует подаче теплоносителя, а в режиме прокачивания подает его из исследуемой секции парогенератора в прибор, регистрирующий наличие водорода.

Предварительные расчеты и исследования показывают, что наилучшие энергомассовые показатели в рассматриваемом случае имеет конструкция индукционного МГД-насоса-дросселя с винтовым каналом. Это объясняется высоким давлением (до $8 \cdot 10^5$ Па), требуемым в режиме противовключения, и малым расходом теплоносителя $[(2 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}]$ в режиме прокачивания. Система отбора проб с применением МГД-насоса-дросселя не имеет движущихся механических частей, уплотнений, позволяет за счет изменения выходных параметров источника питания легко варьировать величину проб, периодичность и последовательность их отбора.

МГД-дроссели, используемые для регулирования расходов рабочих сред, в принципе, представляют электрическую машину, работающую в тормозном режиме. Конструктивно МГД-дроссель, как и МГД-насос, состоит из канала, по которому движется жидкий металл, и индуктора, создающего магнитное поле. В силу известной простоты

в настоящее время наибольшее распространение получили дроссели с постоянным магнитным полем.

При движении жидкого металла в магнитном поле в нем индуцируются ЭДС, под действием которых протекают токи, замыкающиеся в зависимости от конструктивного исполнения, либо по самому металлу, либо по специальным токозамыкающим элементам. Взаимодействие токов с магнитным полем создает электромагнитную силу, тормозящую поток. В настоящее время предложено значительное число конструктивных схем дросселей [2, 12], достаточно полно проведены их исследования и разработаны основы расчета [1—7, 12—14].

МГД-дроссели удобно классифицировать по типу канала и магнитной системы. Для работы с щелочными металлами используются следующие типы каналов: прямоотный цилиндрический (канал кольцевого или кругового сечения); бифилярный кольцевого сечения (со взаимоположенным направлением движения потоков в каждом канале); винтовой, образуемый винтовым шнеком и наружным цилиндром.

Магнитные системы подразделяются по виду создаваемого магнитного поля (радиальное или поперечное) и по способу возбуждения (на постоянных магнитах или с обмоткой возбуждения).

Принципиально возможны любые комбинации каналов и магнитных систем дросселей, однако наиболее широко применяются конструктивные схемы, представленные на рис. 1. На этом рисунке стрелками показаны направления векторов скорости жидкого металла v , индукции внешнего магнитного поля B , плотности токов, индуцированных в жидком металле j .

МГД-дроссели с каналом кругового сечения могут быть выполнены с поперечным и радиальным магнитным полем. В конструкциях с поперечным полем (рис. 1 а, б) индуцированный в жидком металле ток замыкается в основном по стенкам канала (рис. 1, б). Для увеличения эффективности этих дросселей каналы делают двухслойными. При этом электропроводность внешнего слоя должна быть выше, чем внутреннего. Если материал первого слоя — нержавеющая сталь, то для второго может быть использована, например, медь.

В дросселях с радиальным магнитным полем индуцированные токи замыкаются по жидкому металлу. Примером такой конструкции может служить схема, изображенная на рис. 1, г, но без внутреннего сердечника. Недостаток этих дросселей — отсутствие на оси канала тормозной силы, так как здесь нет радиального компонента поля. Устранить этот недостаток можно, если полюсные наконечники выполнить наклонными к продольной оси канала [15]. В этом случае образуется несимметричное поле с радиальным компонентом на оси канала, отличным от нуля.

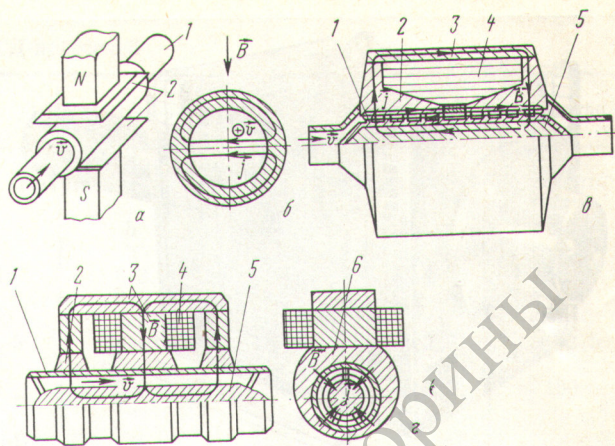
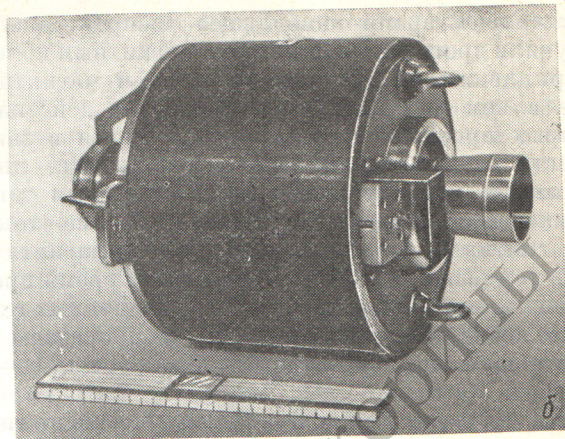
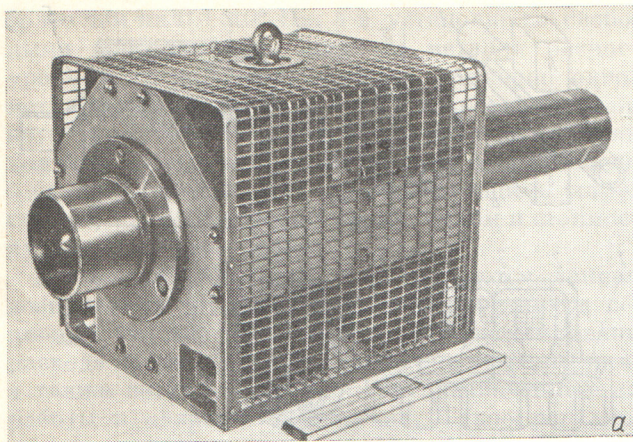


Рис. 1. Конструктивные схемы МГД-дросселей с каналами кругового сечения и поперечным магнитным полем (а, б), винтового типа (в), с каналом кольцевого сечения и радиальным магнитным полем (г): 1 — канал; 2 — полюсный наконечник; 3 — элементы магнитопровода; 4 — обмотка возбуждения; 5 — внутренний сердечник

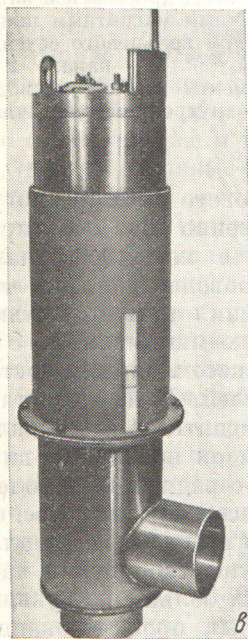
Дроссели с каналом кругового сечения могут устанавливаться непосредственно на смонтированном контуре, при этом в качестве канала используется участок трубопровода. Понятно, что гидравлические потери давления при отсутствии магнитного поля будут в них минимальны. Эти два обстоятельства являются несомненными достоинствами упомянутых дросселей. К их недостаткам относится большой немагнитный зазор: для дросселя с поперечным полем он превышает диаметр канала, а для дросселя с радиальным полем зависит от расстояния между соседними полюсными наконечниками, их длины и диаметра канала. Поэтому потери на возбуждение, габариты и масса индуктора в этих дросселях больше по сравнению с другими типами. Опыт проектирования и результаты расчетных работ показывают, что их целесообразно применять, когда перепад давления на дросселе $p \leq 0,1 \cdot 10^5$ Па. Как следует из экспериментальных исследований при расходе натрия $Q \leq 100$ м³/ч, их $p - Q$ -характеристика практически линейна.

В МГД-дросселях винтового типа (рис. 1, в) жидкий металл движется по винтовому каналу, пересекая радиальное магнитное поле, а индуцированный ток замыкается по стенкам канала. В качестве стенок могут быть использованы элементы магнитопровода, выполненные из материала, стойкого к воздействию жидких металлов, например, из «Армко».

В связи с тем, что активная длина канала — длина винтовой линии — в этих дросселях может быть достаточно большой, значения перепада давления также могут быть велики и достигать десятков МПа. По этой же причине здесь значительны



Р и с. 2. Магнитогиродинамические дроссели МДЦ-3/20 (а), МДЦ-10/700 (б), МДЦ-3/30 (в)



и гидравлические потери давления. Дроссели этого типа в настоящее время имеют ограниченное применение и используются, как правило, в установках с небольшим расходом рабочих сред и значительным требуемым перепадом давления.

Наибольшее распространение получили дроссели с каналами кольцевого сечения и радиальным или поперечным магнитным полем. В конструкциях с радиальным полем (рис. 1, г) для индук-

тированных токов выполняется условие идеального короткого замыкания, а при поперечном поле (рис. 1, а) индуктированный ток замыкается по стенкам канала и внутреннему сердечнику, являющемуся хорошим токозамыкающим элементом. Заметим, что дроссели с каналом кольцевого сечения эффективнее, чем с каналом кругового сечения, в силу лучших условий для замыкания индуктированных токов и меньшего немагнитного зазора. Однако при радиальном магнитном поле из-за влияния индуктированных токов (реакции якоря) характер зависимости $p_э = f(Q)$ или $p_э = f(R_m)$ в них существенно нелинейный. Здесь $p_э$ — электромагнитное давление. Величина этого влияния определяется параметром, называемым магнитным числом Рейнольдса $R_m = \mu_0 \sigma Q a^{-1}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м — магнитная проницаемость вакуума; σ — удельная электропроводность; a —

характерный линейный размер. Подробно данный вопрос освещен в работах [4, 5]. Здесь лишь отметим, что с увеличением R_m электромагнитное давление вначале растет, достигает максимума, а затем убывает, изменяясь при больших R_m пропорционально R_m^{-1} .

Дроссели с поперечным полем [16] лишены этого недостатка. Однако из-за наличия сопротивления «внешней» цепи — стенки и внутреннего сердечника — перепад давления на них при $R_m < 1$ меньше, нежели в дросселях с радиальным полем. Расчеты показывают, что дроссели с поперечным полем предпочтительнее при расходе сотни и тысячи м³/ч, а дроссели с радиальным полем при меньших значениях расхода в области линейной зависимости $p_э = f(R_m)$.

Линейную зависимость $p_э = f(R_m)$ в широком диапазоне значений R_m для дросселя с радиальным полем можно получить в конструкции с бифилярным каналом [17]. Противоположные направления скоростей жидкого металла и токов в двух смежных по радиусу каналах обеспечивают хорошую компенсацию реакции якоря и устраняют влияние полей индуктированных токов на внешнее магнитное поле. Как показывают исследования, характер зависимости $p_э = f(Q)$ или $p_э = f(R_m)$ в дросселях этого типа близок к линейному практически во всем интересующем нас диапазоне расходов. Их недостатками являются некоторое усложнение конструкции и большие гидравлические потери в канале по сравнению с прямоточными дросселями.

За номинальные параметры МГД-дросселей принимаются [1]: расход Q_n ; гидравлические потери давления p_r при номинальном расходе Q_n в отсутствие магнитного поля; перепад давления на дросселе p при номинальном расходе. С незначительной погрешностью можно считать, что перепад

Характеристики МГД-дросселей

| Параметр | МДЦ-3/20 | МДЦ-5/8 | МДЦ-10/700 | МДЦ-3/30 | МДЦ-3/50 |
|---|----------|---------|------------|----------------------------------|----------|
| Рабочая среда | Натрий | | | Сплав натрий — калий (78% калия) | |
| Расход рабочей среды, м ³ /ч | 20 | 5 | 700 | 30 | 50 |
| Перепад давления на дросселе, 10 ⁵ Па | 3 | 5 | 10 | 3 | 3 |
| Гидравлические потери давления, 10 ⁵ Па | 0,016 | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 0,2 |
| Ток, А | 5 | 6,5 | 8 | 4 | 4 |
| Масса дросселя, кг | 190 | 55 | 310 | 60 | 60 |
| Размер входного и выходного патрубков (наружный диаметр и толщина стенки), мм | 108×5 | 46×3 | 219×12 | 70×2,5 | 70×2,5 |
| Максимальная температура рабочей среды, °С | 350 | 350 | 350 | 150 | 150 |

Примечание:
 1. Перепад давления на дросселе при произвольном расходе $Q < Q_n$, может быть оценен по выражению $p = p_n Q Q_n^{-1}$.
 2. Питание дросселей — постоянный ток напряжением 110 В.
 3. Охлаждение обмоток возбуждения естественное.
 4. Установка дросселей — произвольная.

давления p равен сумме электромагнитного давления p_e и гидравлических потерь давления p_r .

Сравнивая МГД-дроссели с механическими регулирующими вентилями, отметим следующее. Разработанные МГД-дроссели пригодны практически для любых расходов рабочих сред. Плавность и точность регулирования величины расхода дросселями определяется лишь электрической схемой регулирования и управления и может быть практически любой. Суммарный коэффициент гидравлических потерь в канале дросселя в отсутствие магнитного поля в десять и более раз меньше, чем в полностью открытом механическом вентиле. Электромагнитная постоянная времени МГД-дросселей (время установления полной тормозящей силы) не превышает нескольких десятых долей секунды.

МГД-дроссели при питании от источников стабилизированного тока или в случае индуктора с постоянными магнитами обеспечивают стабильную во времени характеристику. Изменяя ток питания дросселя по любому периодическому закону с периодом, большим постоянной времени дросселя, можно соответствующим образом изменять и величину расхода.

В связи с тем, что диаметр и толщину стенки канала дросселей стремятся выбирать равными соответствующим значениям трубопроводов контура, надежность канала и его способность выдерживать аварийное давление равны аналогичным показателям трубопроводов.

Разработанные конструкции дросселей позволяют проводить замену обмоток возбуждения без демонтажа канала дросселя из жидкометаллического контура, что обеспечивает ресурс работы дросселя, равный ресурсу работы канала.

В качестве информации на рис. 2 и в таблице приведены общий вид и характеристики некоторых

МГД-дросселей, разработанных и изготовленных в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витковский И. В., Карасев Б. Г., Кириллов И. Р. — Магнитная гидродинамика, 1977, № 4, с. 131.
2. Витковский И. В. и др. — В кн.: Тезисы докладов Всесоюз. научно-технического семинара «Применение МГД-насосов и МГД-дросселей в народном хозяйстве», Л., изд. НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, 1975, с. 68.
3. Витковский И. В., Карасев Б. Г., Лаврентьев И. В. — Магнитная гидродинамика, 1975, № 4, с. 123.
4. Витковский И. В., Лаврентьев И. В. — Там же, 1976, № 1, с. 107.
5. Андрианов А. Н., Витковский И. В., Лаврентьев И. В. — Там же, 1979, № 2, с. 94.
6. Баранов Г. А. и др. — In: Sixth Intern. Conf. on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. V. 3. Washington, p. 265.
7. Витковский И. В., Карасев Б. Г., Лаврентьев И. В. — Магнитная гидродинамика, 1976, № 3, с. 142.
8. Витковский И. В., Кириллов И. Р. — Там же, 1978, № 2, с. 132.
9. De Bear W. — Nucleonics, 1959, N 6, p. 108.
10. Гельфгат Ю. М., Шишкарёв Э. Е. — В кн.: Автоматизация процессов плавки и разливки. Киев — Днепрпетровск, изд. Ин-та проблем литья АН УССР, 1971, с. 126.
11. Баранов Г. А., Глухих В. А., Кириллов И. Р. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом. М., Атомиздат, 1978.
12. Гельфгат Ю. М. — [2], с. 52.
13. Гельфгат Ю. М., Гудков А. Л. — Магнитная гидродинамика, 1973, № 3, с. 103.
14. Гельфгат Ю. М., Ольшанский С. В. — Там же, 1973, № 3, с. 95.
15. Витковский И. В. и др. — Там же, 1978, № 1, с. 105.
16. Витковский И. В., Кириллов И. Р., Иванов В. В. Авт. свид. СССР № 704715. Бюл. изобрет. 1979, № 47, с. 53.
17. Карасев Б. Г. и др. Авт. свид. СССР № 550227. Бюл. изобрет., 1977, № 10, с. 25.

Поступила в Редакцию 01.12.80