

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МГД-НАСОСЫ

Магнитодинамический (МГД) метод преобразования энергии является более общим по отношению к традиционному электромеханическому. МГД-метод имеет существенные особенности, обусловленные взаимодействием электромагнитного поля со сплошными движущимися токопроводящими средами (плазмой, жидкими металлами, электролитами), что сопровождается рядом эффектов, совокупность которых составляет предмет изучения магнитной гидродинамики. За исторически короткое время (четверть века) созданы МГД-насосы, дозаторы, перемешиватели, дроссели, расходомеры, сепараторы, нагреватели и другие МГД-устройства с жидкометаллическим рабочим телом для металлургии, литейного производства, машиностроения, химической и других отраслей промышленности. Эти достижения во многом стимулировались созданием ядерных реакторов, в которых используется жидкометаллический теплоноситель. МГД-устройства используются во вспомогательных системах ядерных реакторов, в исследовательских системах, в технологических процессах очистки жидкометаллического теплоносителя [1 - 6]. Актуальна проблема создания МГД-насосов большой производительности, способных работать в качестве главных циркуляционных насосов. Они должны быть надёжнее и экономичнее применяемых механических насосов. В установках термоядерного синтеза также имеются проблемы прокачки жидкометаллического теплоносителя по сложным канальным системам. Конструкции МГД-машин для ядерной энергетики определяются ионизирующим облучением, высокими температурами, агрессивностью жидкометаллических теплоносителей и другими особенностями специфических условий ядерных энерготехнологических процессов.

В этих целях создаётся класс оригинальных МГД-машин, получивших название линейно-вихревых, составивших предмет более 20 изобретений [2-6]. Разработаны принципы построения линейно-вихревых МГД-машин с заданным механизмом МГД-взаимодействия: канал в виде круглой трубы в цилиндрическом индукторе: фазы индуктора выполнены в виде шестиходового трубчатого змеевика, начала и концы фаз объединены соответственно в две шестилучевые звезды и образуют две нейтрали, к нейтралям присоединены патрубки для подвода и отвода хладагента. К фазам – спиральям змеевика подводятся шестифазные токи, эти токи могут вводиться кондукционно или индукционно (трансформаторным способом). Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований линейно-вихревых МГД-машин, в цилиндрическом канале МГД-машины индукция, плотность тока, электромагнитная сила трёхкомпонентны, содержат радиальную, азимутальную и аксиальную компоненты.

Радиальная компонента силы направлена к оси канала, и отжимает металл от цилиндрической стенки канала; азимутальная – придаёт жидкому металлу вращательное движение; аксиальная – нагнетает металл вдоль канала насоса. Значимость той или иной компоненты зависит от технологического назначения МГД-машины. При использовании её в качестве магистрального насоса вращение жидкого металла создаёт дополнительные потери (на трение и перемешивание). Поэтому вращение необходимо подавлять, что позволяет повысить КПД, увеличить подачу и напор насоса, продлить срок службы канала.

Разработаны механический и электромагнитный способы подавления вращения, на уровне изобретений предложены МГД-устройства, реализующие эти способы. Обобщённым МГД-устройством является МГД-машина с взаимно зеркальными обмотками, которая может работать как в режиме с вращением жидкого металла, если требуется его перемешивание, когда включена одна обмотка, так и в режиме с подавлением вращения, когда включены обе обмотки. На основе законов движения проводящей среды в электромагнитных полях, а также законов теории цепей с использованием электрических и магнитных схем замещения построены комплексы физических и математических моделей, позволяющих в сочетании с арсеналом современных методов анализа выполнять глубокие и всесторонние исследования МГД-устройств в статике и динамике в различных режимах.

Разработаны основы теории линейно-вихревых МГД-насосов, выполнен в символической форме в относительных единицах анализ течения жидкого металла в электромагнитных полях цилиндрических каналов МГД-насосов, в которых реализован электромагнитный или механический способ подавления вращения металла. Получены локальные и интегральные характеристики, даны рекомендации по конструктивному исполнению МГД-машин. Выполнены экспериментальные исследования на физических моделях.

Кроме идеального канала в виде круглой трубы из огнеупора, идеальных условий охлаждения индуктора (шестиугольного змеевика из труб, по которому прокачивается хладагент) ещё одним из преимуществ линейно-вихревого МГД-насоса является практически равномерное распределение в поперечном сечении канала продольной компоненты электромагнитной силы, что существенно повышает производительность насоса в сравнении с прототипами.

Расчитаны, спроектированы, изготовлены и испытаны опытно-промышленные установки мощностью 250 кВт на промышленных рафинировочных котлах свинцовых заводов. Испытания подтвердили основные положения теории линейно-вихревых МГД-устройств.

Исследования показали, что при очевидных достоинствах линейно-вихревые МГД – устройства относительно сложны по конструкции и могут

быть изготовлены только на специализированных электромашиностроительных предприятиях.

Значительно проще по конструкции и в изготовлении трансформаторные МГД – устройства. Электромагнитные процессы в них аналогичны процессам в силовых трансформаторах. Наиболее уязвимые элементы конструкции – обмотки выполнены в форме катушек, их легче защитить от воздействия высоких температур перекачиваемого металлического расплава, легко заменять в процессе эксплуатации МГД-устройства.

Оригинальные трансформаторные МГД-устройства, разрабатываемые авторами и составившие предмет многих изобретений, классифицируются:

- по виду приложенных к рабочей среде полей на:
 - МГД-устройства с приложенным электрическим полем E ;
 - МГД-устройства с приложенным магнитным полем B ;
 - МГД-устройства с приложенными скрещенными полями $E \times B$;
- по виду МГД-канала на: плоские, цилиндрические, дисковые, кольцевые;
- по характеру замыкания рабочего тока на: контактные, бесконтактные, гарнисажные;
- по числу фаз на: - одно-, двух-, трёхфазные;
- по виду возбуждения магнитного поля в канале: ёмкостного возбуждения, индуктивного возбуждения, с независимым возбуждением, смешанным возбуждением.

Эту классификацию можно продолжить по другим признакам [7-14].

Вскрыты механизмы МГД-взаимодействия и разработаны принципы построения трансформаторных МГД-устройств. МГД-устройства с приложенным E -полем (канал с током в пазу магнитопровода) предлагает смещение центров масс магнитопровода и токопровода. В МГД-насосе с приложенным B -полем (обмотка с током и канал на магнитопроводе) используется магнитное давление на токопроводящую среду, имеет место смещение обмотки относительно канала.

В МГД- устройстве со скрещенными $E \times B$ - полями определяющей является пондеромоторная сила; они сложнее по конструкции, но имеется возможность гибкого управления процессами в канале, многофункциональность (способно работать в режимах насоса, генератора, сепаратора, дросселя, дозатора и др.). Общим в работе всех трёх типов МГД-устройств является скинэффект: МГД-взаимодействие осуществляется полностью в поверхностном слое на длине канала в 3 - 4 толщины скинслоя. Уменьшение длины канала приводит к проникновению поля за канал и снижению напора из-за магнитного противо-

давления. Удлинение канала приводит к увеличению габаритов и массы насоса. Разработаны основы теории трансформаторных МГД-устройств. Решены системы управлений движения проводящей сплошной среды в каналах различных конфигураций с синусоидально меняющимся во времени магнитным полем с учётом влияющих факторов, получено распределение по каналу индукции, плотности тока, напряжённости электрического поля, электромагнитных сил, а также получены выражения для интегральных величин и параметров: мощности (активной, реактивной, полной), напора, КПД, коэффициента мощности. Выполнен на ЭВМ численный эксперимент. Определены условия самовозбуждения переменного тока, его стационарные амплитуды, их устойчивость, частота автоколебаний при работе МГД-устройства с $E \times B$ – полями, в автономной установке с ёмкостным и индуктивным возбуждением в генераторном и насосном режимах. Получен комплекс параметров и характеристик, не имеющий аналогов. Введены схемы замещения, получен и проанализирован ряд зависимостей, в частности, мощностей и КПД от величины краевых эффектов, относительной длины канала, коэффициента нагрузки. Разработана методика расчёта трансформаторных МГД-устройств. Выполнен расчёт серий МГД-машин, получен ряд расчётных зависимостей и выполнен их анализ.

Проведены экспериментальные исследования в жидкометаллических контурах с ртутью, натрием, свинцом, магнием, эвтектиками в широком диапазоне температур (до 800°C) трансформаторных МГД-устройств основных типов, получены характеристики намагничивания, холостого и обратного холостого хода, короткого и обратного короткого замыкания, внешняя, нагрузочная и др. Экспериментально исследовано распределение магнитного поля в МГД-машине, выявлен и исследован продольный краевой эффект, его влияние на характеристики, предложены и исследованы методы подавления его негативного влияния.

На базе результатов исследований разработаны комплекты проектно-конструкторской документации на МГД-насосы, изготовлены опытно-промышленные образцы, выполнены их промышленные испытания при разливе магния с температурой 800°C . МГД-насос показал надёжную работу на всех стадиях функционирования, выдержал полномасштабные испытания, принят ведомственной комиссией к серийному изготовлению и внедрению. На базе МГД-насоса разработан и исследован, изготовлен, испытан в лабораторных условиях и внедрён в промышленность МГД-дозатор припоя [15-16].

Опытно-конструкторские разработки и экспериментальные работы ряда организаций по использованию МГД-методов для решения актуальных задач подтвердили возможность транспортирования металлических расплавов при помощи электромагнитных насосов, электромагнитного дозирования жидких

металлов, искусственного «утяжеления» и «облегчения» жидких металлов в процессе рафинирования [11], возможность отделения от жидких металлов шлаков, газов, других неметаллических включений, вмешивания в металлические расплавы реагентов при рафинировании [12], реализации других принципиально новых операций и процессов электромагнитного воздействия на металлические расплавы при производстве и переработке металлов и сплавов.

Однако эти достижения относятся почти исключительно к области металлов и сплавов с относительно невысокой температурой плавления. Высокотемпературные МГД-установки должны создаваться как оборудование и удовлетворять жестким требованиям [17].

Основными частями МГД-устройства являются металлопровод с каналом по которым движется жидкий металл, обмотка и магнитопровод.

Особенностями металлических расплавов в металлургических пределах являются высокая температура, химическая активность по отношению к материалам обмоток (особенно изоляции), стенок каналов и металлопровода, наличие всевозможных примесей, твердых, жидких, газообразных.

Каналы и металлопроводы МГД-установок необходимо выполнять коррозионно и эрозионно стойкими в среде транспортируемого металлического расплава.

Продукты взаимодействия расплава и материала стенок канала и металлопроводов могут попадать в перекачиваемый жидкий металл и ухудшать его качество.

Необходимо учитывать, чтобы после обработки МГД-устройством выдаваемый металл соответствовал требованиям ГОСТов.

Для обработки некоторых металлов (свинец, олово, магний, литий и др.) стенки каналов можно выполнять из жаропрочных сталей, в этом случае электропроводность каналов оказывается полезной, так как позволяет предварительно разогревать канал пропусканием по нему электрических токов.

Обмотки для создания электромагнитного поля необходимо располагать как можно ближе к каналу для улучшения энергетических характеристик МГД-устройства, но для повышения надежности и долговечности обмотки её желательно вынести из зоны высоких температур. Компромисс этих противоречивых требований достигается оптимальным проектированием МГД-устройства.

Другой важной задачей является рациональная компоновка МГД-устройства с другим металлургическим оборудованием, от этого в существенной степени зависит успех использования МГД-технологии.

Немаловажной проблемой является цикличность работы МГД-устройства; в зависимости от периода работы в цикле МГД-устройство должно

поддерживаться в разогретом состоянии или быстро вводиться в состояние рабочей готовности.

Кроме того, сам обрабатываемый металл также должен находиться в рабочей готовности и на выходе из МГД-устройства удовлетворять соответствующим требованиям, в том числе требованиям ГОСТ.

И, наконец, переход на новые МГД-технологии должен быть экономически и социально оправданным.

Этим критериям наиболее полно удовлетворяют МГД-насосы оригинальные [17, 18], содержащие канал с патрубками, электроды и магнитопровод. В этих насосах нет обмотки, а магнитное поле создается током, протекающим по каналу, когда на электроды подано электрическое напряжение.

Испытания экспериментальной установки дозирования жидкометаллических расплавов на базе безобмоточного электромагнитного насоса оригинальной конструкции показали возможность дальнейшего совершенствования конструкции с целью оптимизации его электромагнитных и гидродинамических характеристик.

Разработанная методика расчета распределения плотности токов, электромагнитных сил, скорости расплава, основанная на принципе минимизации электромагнитной и гидродинамической мощности МГД-потока, позволила определить условия получения максимального градиента давления в активной зоне канала. В результате получена конструкция электромагнитного насоса, оптимальная по конфигурации, размерам трубопровода, форме активной зоны канала, критерием оптимизации которой является минимум потерь мощности при движении расплава по гидравлическому тракту.

На основании расчетных и экспериментальных данных распределения электромагнитных сил найдено оптимальное положение магнитной системы относительно активной зоны канала МГД-насоса.

Показано, что использование переменного тока для кондукционных электромагнитных насосов упрощает проблему токоподводов. Однако при этом возникают нежелательные вибрации, связанные, прежде всего с опасной для стенок канала вибрацией вследствие пульсаций давления. Кроме этого усиливается неравномерность распределения электромагнитных сил в объеме жидкого металла, связанная с проявлением «скин-эффекта».

Поэтому целесообразно определить оптимальный диапазон изменения частоты тока с целью регулирования скорости подачи расплава. Результаты экспериментов, проведенные на опытной установке, в качестве которой был использован горизонтальный открытый желоб, показали, что картина течения сплава Розе на частоте 50 Гц мало отличается от той, что наблюдается на постоянном токе. Заметное перераспределение электромагнитных сил и скоро-

стей начинается при значениях частоты тока источника свыше 300 Гц. Ярко проявляются вихревые течения, приводящие к снижению производительности электромагнитного насоса.

Спроектированная во ВНИИ энергоцветмете, изготовленная, испытанная и внедренная на Березниковском титано-магниево-комбинате МГД-установка по авторскому свидетельству на изобретение показала надежную работу на всех стадиях ее функционирования при перекачке расплава магния с температурой 800°C из металлургической печи на разливочную машину.

По результатам промышленных испытаний в конструкцию МГД-установки внесены существенные изменения, что послужило созданию высокотемпературной безобмоточной МГД-установки нового поколения.

Безобмоточные МГД-насосы потребляют ток в несколько килоампер напряжением несколько вольт, что является проблемой использования насоса на постоянном токе. Эта проблема облегчается при использовании переменного тока, однако возникают нежелательные вибрации вследствие пульсаций давления, способных разрушить канал, в особенности в зоне присоединения к нему токопроводов. Эти и другие проблемы устраняются в МГД-установке с безобмоточными МГД-насосами, выполненными трехфазными и индукционными (с трансформаторным вводом токов).

Разрабатываемая МГД-установка содержит трехфазный погружной МГД-насос 1, трехфазный наружный МГД-насос 2, трехфазный индуктор трансформаторного типа 3, запитываемый трехфазными токами погружной и наружный МГД-насосы. Оба МГД-насосы выполнены безобмоточными.

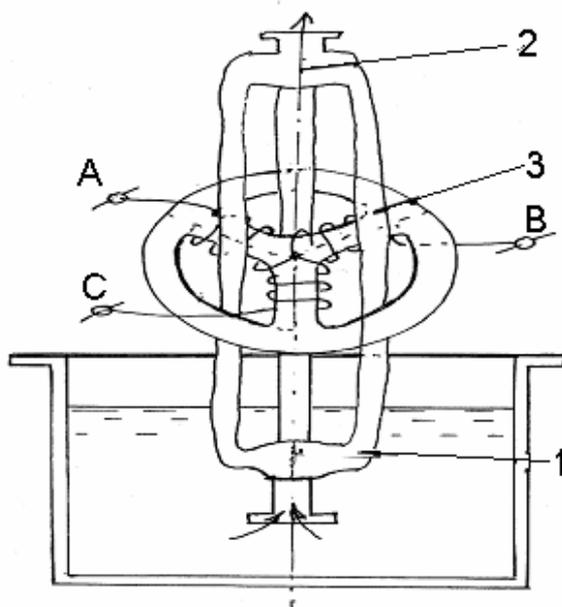


Рис. 1. Схема МГД-установки (магнитные системы сняты)

Погружной МГД-насос содержит (рис. 2) шихтованную магнитную систему (рис. 2, а) состоящую из трех стержней 1, с одного торца насоса зашунтированных ярмом 2, а с другого – имеющих три полюсных наконечника 3. Полюсные наконечники 3 образуют зазор 4, в который устанавливается МГД-канал. Полюсные наконечники расположены относительно друг друга так, что их продольные оси в поперечном сечении являются вершинами равностороннего треугольника, а поверхности полюсных наконечников, образующие зазор 4, выполнены в форме двухгранных углов по 120° . Полюсные наконечники 3 одеты в теплоизоляционные рубашки, предотвращающие также проникновение жидкого металла в шихтованную магнитную систему. Если в жидкий металл погружаются также и стержни и ярмо, то вся магнитная система одевается в теплоизоляционную рубашку.

Зазор 4 между полюсными наконечниками 3 в поперечном сечении имеет вид трехлучевой звезды. Канал для перекачивания жидкого металла (рис. 2, б), состоит из трех труб 5, сваренные сплюснутые концы этих труб 6 образуют МГД-каналы 7 и 8. Стенки сплюснутых концов 6 труб 5 привариваются друг к другу, а к ним приваривается входной патрубок 9, расположенный со стороны противоположной ярму магнитной системы погружного МГД-насоса. Другие концы 6 трех труб 5 также сплюсциваются, стенки их свариваются между собой и к ним привариваются выходной патрубком 10, так образуется МГД-канал наружного МГД-насоса. Наружный МГД-насос также имеет шихтованную магнитную систему, состоящую из трех полюсных наконечников, образующих зазор в форме трехлучевой звезды, трех стержней, зашунтированных со стороны выходного патрубка ярмом, имеющим выходное осевое отверстие, через которое проходит выходной патрубком 10.

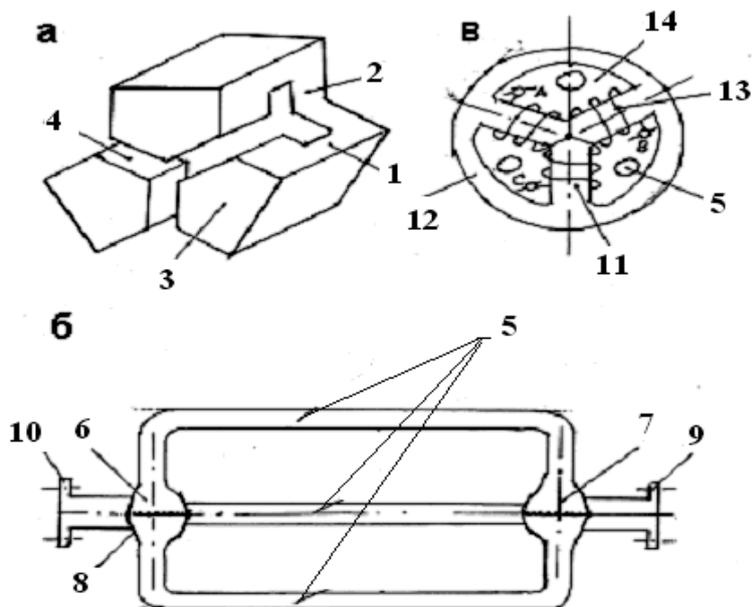


Рис. 2. Основные узлы МГД-установки: а – магнитная система; б – канал для жидкого металла; в – трехфазный индуктор

Трехфазный индуктор трансформаторного типа, (рис. 2, в), служит для питания трехфазными токами МГД-каналы погружного и наружного МГД-насосов. Индуктор содержит шихтованный магнитопровод и три обмотки катушечного типа. Магнитопровод содержит три стержня 11, образующих трехлучевую звезду, стержни 11 замкнуты между собой кольцевым ярмом 12, также шихтованным из пластин трансформаторной стали.

На три стержня 11 нанизаны три катушечных обмотки 13, являющиеся первичными обмотками трансформатора.

Три радиальных стержня 11 и кольцевое ярмо 12 образуют трансформаторный магнитопровод с тремя окнами 14. Через каждое окно 14 проходит по одной трубе 5 из трех труб, образующих канал для жидкого металла; эти трубы 5 совместно с МГД-каналом 7 и 8 являются «вторичными обмотками» трехфазного индуктора трансформаторного типа.

Три первичные катушечные обмотки 13 индуктора соединены по схеме «звезда» или «треугольник». На обмотки 13 подается трехфазное напряжение и по обмоткам текут трехфазные токи. При этом по стенкам МГД-каналов 7, 8 и стенкам соединяющих их труб 5, 6 потекут вторичные трансформаторные токи и нагревают стенки до температуры перекачиваемого металла.

После этого МГД-установка на миксере с жидким металлом устанавливается так, что погружной МГД-насос погружается в жидкий металл миксера. Тогда токи потекут по жидкому металлу, заполнившему МГД-канал. Эти токи создадут собственные магнитные потоки, замыкающиеся по полюсным кончикам 3, стержням 1 и ярму 2. В результате между полюсными кончиками 3 в МГД-канале 7 погружного МГД-насоса создадутся магнитные поля. При взаимодействии радиальных токов с этими полями создадутся электромагнитные силы, направленные аксиально от входного патрубка 9 к магнитному ярму 2. Эти силы втягивают жидкий металл из миксера в МГД-канал 7 и далее нагнетают металл в магнитопроводы 5 и МГД-канал 8 наружного МГД-насоса. При этом наружный МГД-насос также начнет нагнетать жидкий металл в выходной патрубок 10 МГД-установки. В результате жидкий металл под напором МГД-каналов 7 и 8 погружного и наружного МГД-насосов перекачивается из миксера на разлив (или в другой металлургический агрегат).

После запуска МГД-установку можно переместить так, чтобы погружной МГД-насос поднялся выше зеркала металла в миксере, что приведет к увеличению его срока службы.

Предлагаемая МГД-установка, включающая погружной МГД-насос, наружный МГД-насос, индуктор трансформаторного типа, питающий каналы МГД-насосов трехфазными токами, обладает по сравнению с проточными следующими достоинствами: объединение трех фазных секций в единый МГД-

канал позволяет устранить пульсирующую составляющую электромагнитных сил и электромагнитное давление, а следовательно и вибрации, разрушающие канал. Обеспечивается равномерная загрузка фаз трехфазной электросети. Трансформаторный (индукционный) ввод тока в МГД-каналы позволяет избежать применения громоздких токопроводов электрического тока величиной порядка 10 килоампер.

Индукционный ввод тока в МГД-каналы, в отличие от кондукционного, позволяет сделать канал безэлектродным, более простым в изготовлении, надежным, с увеличенным сроком службы.

При использовании трехфазной системы электромагнитный напор МГД-насоса увеличивается в 2-3 раза в тех же габаритах. Имеет место удобный разогрев металлопровода перед подачей в него жидкого металла с температурой 800 °С. Массогабаритные показатели насоса улучшаются в 2-3 раза. МГД-установка не требует для запуска вакуумной установки. Отсутствие обмоток в высокотемпературных зонах МГД-каналов позволяет использовать МГД-установку для перекачивания металлов с температурой 800 °С и выше.

Библиографический список

1. Глухих В. А., Тананаев А. В., Кирилов И. Р. Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике. М: Энергоиздат, 1987. 264 с.
2. Смолин Г.К. Системы трансформаторных и линейно-вихревых асинхронных МГД-устройств для высокотемпературных металлических расплавов // Труды 1-й Международной конференции по электротехнологии. МКЭЭ-94. 4.1. Суздаль. 1994. С. 136
3. А.с. 1053228 СССР, МКИ Н 02 К 15/04. Способ изготовления обмотки индукционной машины // Г. К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1983. № 41.
4. А.с. 103833 СССР, МКИ F 27 D11/06. Индукционная печь / Г. К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1981. № 29.
5. А.с. 1183810 СССР, МКИ 4 F 27D11/06. Индукционная печь / Г. К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1985. № 37.
6. А.с. 1700707 СССР, МКИ 5 Н 02 К 44/06. Индукционный насос / Г. К. Смолин, В. А. Бегалов, Я. Г. Смолин // Открытия. Изобретения. 1991. № 47.
7. А.с. 299924 СССР, МКИ Н02 № 4/20. Электромагнитный насос //Г.К.Смолин// Открытия. Изобретения. 1971. № 12.

8. А.с. 823803 СССР, МКИ 3 F 27 D 11/04. Электрический нагреватель жидкого металла /Г. К. Смолин, В. П. Ксенофонов // Открытия. Изобретения. 1981. № 15.
9. А.с. 1007734 СССР, МКИ В 03 С 1/30. МГД-сепаратор / Г.К.Смолин, И.Н.Фетисов, Ю. П. Сафронов // Открытия. Изобретения. 1983. № 12.
10. А.с. 1033833 СССР, МКИ F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г.К.Смолин // Открытия. Изобретения. 1983. № 29.
11. А.с.1113173 СССР, МКИ В 03 С 1/30. МГД-сепаратор // Открытия. Изобретения. 1984. № 34.
12. А.с. 1159642 СССР, МКИ В 03 С 1/30. МГД-сепаратор /Г.К.Смолин // Открытия. Изобретения. 1985. № 21.
13. А.с. 1461508 СССР, МКИ 4 В 03 С 1/30. МГД-сепаратор / Я.К.Смолин, Г.К.Смолин//1989.№ 8.
14. Патент 2035827 RU, МКИ 6 Н 02 К 44/04. Кондукционный электромагнитный насос / Г.К. Смолин, Ф.Н. Сарапулов, Я.Г. Смолин, В.А. Бегалов // Открытия. Изобретения 1995. № 14.
15. *Smolin G. K., Fedorova S. V., Maryin G. A. Magneto hydrodynamic dosing pump*// Proceeding of the Vth International scientific-technical conference on Unconventional Electromechanical and Electronical Systems, 5-8 September.- Szczecin; Miedzyzroc.2001. P. 1105-1108.
16. *Смолин Г.К., Федорова С.В.* МГД-насос-дозатор. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2003. 129 с.
17. *Полищук В.П.* Критерии оценки пригодности МГД-техники для литейного производства. МГД в литейном производстве и металлургии. Киев: ИПЛ АН УССР, 1984. С. 3-10.
18. А.с. 1289355 СССР, МКИ 4 Н 02 К 44/02, 44/04. Электромагнитный насос. / Г.К.Смолин, Городецкий В.А. // Открытия. Изобретения. 1987. № 3.
19. Пат. 2035827 RU, МКИ 6 Н 02 К 44/04. Кондукционный электромагнитный насос / Г.К. Смолин, Ф.Н. Сарапулов, Я.Г. Смолин, В.А. Бегалов // Открытия. Изобретения. 1995. № 14..К. Смолин