

МГД-УСТРОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

Смолин Г.К., Шабалдин Е.Д.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: smolingk@yandex.ru, eugeniy_shabaldin@mail.ru

Аннотация – Приведены результаты исследования и внедрения оригинальных МГД-устройств трансформаторного типа, перспективы их разработки для высокотемпературных металлургических расплавов.

Ключевые слова - МГД-устройства трансформаторного типа, высокотемпературный жидкий металл, перекачивание, дозирование.

Магнитогидродинамический (МГД) метод преобразования энергии в сравнении с традиционным электромеханическим 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 созданы МГД-устройства: насосы, дозаторы, перемешиватели, дроссели, расходомеры, сепараторы, нагреватели и другие МГД-устройства с жидкометаллическим рабочим телом для металлургии, литейного производства, машиностроения, химии. Эти достижения во многом стимулировались созданием МГД-устройств в ядерной энергетике для технологических процессов очистки жидкометаллического теплоносителя. Исследования показали, что при очевидных достоинствах МГД-устройства для ядерной энергетике относительно сложны по конструкции и могут быть изготовлены только на специализированных электромашиностроительных предприятиях и не могут быть применены в металлургии. Значительно проще по конструкции и в изготовлении МГД-устройства трансформаторного типа. Электромагнитные процессы в них аналогичны процессам в силовых трансформаторах. Выполненные в форме катушек обмотки МГД-устройств легче защитить от воздействия высоких температур обрабатываемого металлургического расплава и заменить в процессе эксплуатации. Оригинальные МГД-устройства трансформаторного типа, разрабатываемые авторами и составившие предмет многих изобретений [1-16], классифицируются: по виду приложенных к рабочей среде полей; по форме МГД-канала; по характеру замыкания рабочего тока; по числу фаз; по способу возбуждения магнитного поля в канале; классификацию можно продолжить по другим признакам [5-14]. Разработаны принципы построения МГД-устройств трансформаторного типа. МГД-устройство с приложенным Е-полем (канал с током в пазу магнитопровода) предполагает смещение центров масс магнитопровода и токопровода. В МГД-насосе с

приложенным В-полем (обмотка с током и канал на магнитопроводе) используется магнитное давление на токопроводящую среду, имеет место смещение обмотки относительно канала. В МГД-устройствах трансформаторного типа со скрещенными ЕхВ-полями определяющей является пондеромоторная сила; они сложнее по конструкции, но имеется возможность гибкого управления процессами в канале, многофункциональность (способность работать в режимах насоса, генератора, сепаратора, дросселя, дозатора и др.). Общим в работе всех трёх типов МГД-устройств является скинэффект: МГД-взаимодействие осуществляется на длине канала в 3–4 толщины скинслоя. Укорочение канала приводит к проникновению поля за канал и снижению напора из-за магнитного противодавления, а удлинение - к увеличению габаритов и массы насоса. Разработаны основы теории МГД-устройств. Решены системы уравнений движения проводящей сплошной среды в МГД-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: мощности (активной, реактивной, полной), напора, КПД, коэффициента мощности. Выполнен численный эксперимент. Определены условия самовозбуждения переменного тока, его стационарные амплитуды, их устойчивость, частота автоколебаний при работе МГД-устройства трансформаторного типа с ЕхВ-полями в автономной установке с ёмкостным и индуктивным возбуждением в генераторном и насосном режимах. Введены схемы замещения, получен и проанализирован ряд зависимостей, в частности, мощностей и КПД от величины краевых эффектов, относительной длины канала, коэффициента нагрузки. По разработанной методике выполнен расчёт серий МГД-машин, выполнен анализ расчётных зависимостей. В экспериментальных исследованиях МГД-устройств трансформаторного типа в жидкометаллических контурах с ртутью, натрием, свинцом, магнием, эвтектиками в широком диапазоне температур (до 800°С) получены характеристики намагничивания, холостого и обратного холостого хода, короткого и обратного короткого замыкания, внешняя, нагрузочная; 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. Разработаны комплекты проектно-конструкторской документации на МГД-насосы трансформаторного типа, изготовлены опытно-промышленные образцы, выполнены их промышленные испытания при разливе магния с температурой 800°C. МГД-насос трансформаторного типа показал надёжную работу на всех стадиях функционирования, выдержал полномасштабные испытания, принят ведомственной комиссией к внедрению. Разработан, исследован, изготовлен, испытан в лабораторных условиях и внедрён в промышленность МГД-дозатор припоя [16, 18].

МГД-установки создаются как специальное металлургическое оборудование и удовлетворяют жестким требованиям работы с металлургическими расплавами с высокой температурой, химически активными, с наличием всевозможных примесей, твердых, жидких, газообразных. И, наконец, переход на новые МГД-технологии должен быть экономически и социально оправданным. Этим критериям наиболее полно удовлетворяют оригинальные МГД-насосы трансформаторного типа нового поколения, содержащие канал с патрубками, электроды и магнитопровод. В этих насосах нет обмотки, а собственное магнитное поле создается током, протекающим по каналу, когда на электроды подано электрическое напряжение. Испытания экспериментальной установки дозирования жидкометаллических расплавов на базе безобмоточного насоса оригинальной конструкции показали возможность дальнейшего совершенствования конструкции с целью оптимизации его электромагнитных и гидродинамических характеристик [12, 16]. 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 насоса трансформаторного типа, 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 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 скоростей начинается при значениях частоты тока источника свыше 300 Гц. Ярко проявляются вихревые течения, приводящие к снижению производительности насоса. Спроектированная, изготовленная, испытанная и внедренная на титано-магниевом комбинате МГД-установка по авторскому свидетельству на изобретение показала надёжную работу на всех стадиях ее функционирования при перекачке расплава магния с температурой 800 °С из металлургической печи на разливочную машину. По результатам промышленных испытаний в конструкцию внесены существенные изменения, что послужило созданию высокотемпературной безобмоточной МГД-установки нового поколения.

Безобмоточные МГД-насосы потребляют ток в несколько килоампер напряжением в 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 токоподводов. Эти и другие проблемы устраняются в МГД-установке с безобмоточными трехфазными насосами с трансформаторным вводом токов.

Разрабатываемая МГД-установка содержит трехфазный погружной МГД-насос, трехфазный наружный МГД-насос, трехфазный индуктор трансформаторного типа, запитывающий трехфазными токами погружной и наружный МГД-насосы.

Погружной МГД-насос содержит шихтованную магнитную систему, состоящую из трех стержней, с одного торца насоса зашунтированных ярмом, а с другого – имеющих три полюсных наконечника. Полюсные наконечники образуют зазор, 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, выполнены в форме двухгранных углов по 120°. Полюсные наконечники 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 между полюсными наконечниками в поперечном сечении имеет вид трехлучевой звезды. Канал для перекачивания жидкого металла состоит из трех труб, сваренные сплюсненные концы этих труб образуют два МГД-канала. Стенки сплюсненных концов труб привариваются друг к другу, а к ним приваривается входной патрубок, расположенный со стороны противоположной ярму магнитной системы погружного МГД-насоса. Другие концы трех труб также сплюсняются, стенки их свариваются между собой и к ним привариваются выходной патрубок; 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 патрубок. Трехфазный индуктор трансформаторного типа 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, образующих трехлучевую звезду, стержни замкнуты между собой кольцевым ярмом, также шихтованным из пластин трансформаторной стали. На три стержня наизаны три катушечных обмотки, являющиеся первичными обмотками трансформатора. Три радиальных стержня и кольцевое ярмо образуют трансформаторный магнитопровод с тремя окнами. Через каждое окно проходит по одной трубе из трех труб, образующих канал для жидкого металла; эти трубы совместно с МГД-каналами являются «вторичными обмотками» трехфазного индуктора трансформаторного типа.

Три первичные катушечные обмотки индуктора могут соединяться как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». На обмотки подается трехфазное напряжение и по обмоткам текут трехфазные токи. При этом по стенкам МГД-каналов и стенкам соединяющих их труб текут 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 в канале собственные магнитные потоки, замыкающиеся по полюсным наконечникам, стержням и ярму. В результате между полюсными наконечниками в МГД-канале погружного МГД-насоса создадутся магнитные поля. При взаимодействии радиальных токов с этими полями создадутся электромагнитные силы, направленные аксиально от входного патрубка к магнитному ярму. Эти силы втягивают жидкий металл из миксера в МГД-канал и далее нагнетают металл в металлопроводы и МГД-канал наружного МГД-насоса. При этом наружный МГД-насос также начнет нагнетать жидкий металл в выходной патрубок МГД-установки. В результате жидкий металл под напором МГД-каналов 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 прототипами следующими достоинствами: объединение трех фазных секций в единый МГД-канал позволяет устранить

пульсирующую составляющую электромагнитных сил и электромагнитного давления, а, следовательно, и вибрации, разрушающие канал. Обеспечивается равномерная нагрузка фаз трехфазной электросети. Трансформаторный (индукционный) ввод тока в МГД-каналы позволяет избежать применения громоздких токоподводов с током 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. Анализ распределения по МГД-каналу магнитной индукции, плотности электрического тока, плотности электромагнитных сил, электромагнитного напора, механической мощности, КПД, коэффициента мощности в зависимости от магнитного числа Рейнольдса при реальных длинах МГД-канала показывает перспективность предложенных безобмоточных МГД-устройств для металлургии и литейного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] А.с. 103833 СССР, МКИ F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г.К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1981. № 29.
- [2] А.с. 1183810 СССР, МКИ 4 F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г.К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1985. № 37.
- [3] А.с. 299924 СССР, МКИ H02 N4/20. Электромагнитный насос // Г.К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1971. № 12.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] А.с. 1033833 СССР, МКИ F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г.К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1983. № 29.
- [7] А.с. 1113173 СССР, МКИ В 03 С 1/30. МГД-сепаратор // Открытия. Изобретения. 1984. № 34.
- [8] А.с. 1159642 СССР, МКИ В 03 С 1/30. МГД-сепаратор / Г.К. Смолин // Открытия. Изобретения. 1985. № 21.
- [9] А.с. 1461508 СССР, МКИ 4 В 03 С 1/30. МГД-сепаратор / Я.Г. Смолин, Г.К. Смолин // 1989. № 8.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Смолин, Г.К. МГД-насос-дозатор / Г.К.Смолин, С.В. Федорова. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2003. -129 с.
- [13] Смолин, Г.К. Системы трансформаторных и линейно-вихревых асинхронных МГД-устройств для высокотемпературных металлических расплавов / Г.К.Смолин // Труды 1-й Международной конференции по электротехнологии. МКЭЭ-94. 4.1. Суздаль, 1994.- С. 136.
- [14] Смолин, Г.К. Линейно-вихревые и трансформаторные МГД-устройства / Г.К.Смолин, Е.Д. Шабалдин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: Материалы 1 Международной научно-практической конференции. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского университета, 2015.- С. 216-223.
- [15] Смолин, Г.К. Магнитогидродинамический сепаратор / Г.К.Смолин //Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сборник докладов 6-й Междунар. науч.-практ. конф.- Екатеринбург: УрФУ, 2015.- С. 160-162.
- [16] Smolin, G.K. Magnetohydrodynamic dosing pump / G.K.Smolin, S.V. Fedorova, G.A. Maryin. // Proceeding of the Vth International scientific-technical conference on Unconventional Electromechanical and Electronical Systems, 5-8 September. - Szczecin; Miedzycroc, 2001.- P. 1105-1108.