

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Висвітлені основні наукові напрямки досліджень відділу електромагнітних систем. Викладено сутність досліджень та наведено основні наукові результати, отримані в 2008 році.

Представлены основные научные направления исследований отдела электромагнитных систем. Изложена суть исследований и приведены основные научные результаты, полученные в 2008 году.

Наиболее яркими проявлениями электромагнитного поля в проводящей среде являются термические и силовые процессы. Теория и методы анализа электромагнитного поля в электромагнитных системах для нагрева плоского проката металлов, одного из основных направлений научных исследований отдела электромагнитных систем, в 2008 году получили развитие в части трехфазных индукционных систем без ферромагнитного сердечника. Разработанные ранее индукционные системы для нагрева плоского проката металлов на основе трехфазных линейных индукционных машин успешно применяются в промышленности для термообработки цветных металлов. Одним из основных достоинств индукционного нагрева плоского проката металлов в бегущем магнитном поле является отсутствие производственного шума, обусловленного силовым воздействием магнитного поля на нагреваемую ленту и магнитным притяжением индукторов. В бегущем поле интегральное значение силы не зависит от времени, поэтому нет вибрации индукторов, а лента находится в состоянии электродинамической стабилизации по центру зазора.

При нагреве в таких системах ферромагнитных лент наблюдается одностороннее притяжение ленты к ферромагнитному сердечнику индуктора, что приводит к механическому повреждению ее поверхности. В связи с этим были рассмотрены и найдены пространственные конфигурации высокочастотных индукторов без сердечников в виде токовых контуров. Однако область использования однофазных индукторов ограничивается относительно малыми удельными мощностями, поскольку при термообработке ферромагнитных листов уже при удельных мощностях 100...150 кВт/м² уровень шума превышает предельно допустимые нормы на всех применяемых в электротермии частотах от 50 до 2400 Гц.

Для устранения производственного шума и одностороннего притяжения ферромагнитных лент представляется целесообразным использовать индукторы бегущего магнитного поля без ферромагнитных магнитопроводов [5].

Анализ электромагнитных процессов в индукционной системе выполнен на основе решения уравнений Максвелла, которые при введении допущения о постоянстве магнитной проницаемости μ и электропроводности σ сводится к уравнению индукции:

$$\Delta B - \mu\sigma[\partial B/\partial t + (v \text{ grad})B] = \text{rot } j_{\text{ст}}. \quad (1)$$

Понижение размерности уравнения (1) выполнялось методом интегральных преобразований (преобразование Фурье по продольной координате и интегральное преобразование в конечных пределах по поперечной оси) с учетом особенностей модели «чередующихся индукторов». Последнее позволило также свести решение к нахождению лишь одной, нормальной составляющей индукции магнитного поля. Задание сторонних токов выполнено с использованием обобщенной единичной функции с учетом реального пространственного расположения трехфазной обмотки индуктора.

На основе найденного решения уравнения (1) получены функциональные зависимости для полной мощности индукционной системы и определены составляющие электродинамической силы. Выполнен анализ нормальной составляющей электродинамической силы, действующей на ферромагнитную ленту в зависимости от конструктивных и режимных харак-

теристик (частота питания, мощность) индуктора. Показано, что существует соотношение конструктивных и режимных характеристик, при котором ферромагнитная лента стабилизируется по оси индукционной системы. Кроме того, многовариантные численные эксперименты свидетельствуют о незначительной величине нормальных к ленте дестабилизирующих электродинамических сил, которые вполне могут компенсироваться натяжением ленты в технологических линиях. Установлены соотношения конструктивных размеров индуктора и нагреваемой ленты, при которых удается получить удовлетворительную (по технологическим характеристикам) равномерность термообработки по ширине. Дальнейшие исследования по теме индукционного нагрева плоского проката будут направлены на установления взаимосвязи и согласования характеристик отдельных элементов электротехнического комплекса – трехфазных преобразователей частоты и собственно линейных индукторов при изменении режимов термообработки и типоразмеров нагреваемых лент.

В 2008 году научные исследования отдела электромагнитных систем были также связаны с силовым действием магнитного поля на жидкий металл в процессах непрерывной разливки стали. В работе [8] исследовано силовое действие высокочастотного электромагнитного поля на мениск жидкого металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Определены основные режимные и энергетические характеристики электромагнитного устройства для формообразования мениска. Форма свободной поверхности жидкого металла в кристаллизаторе определялась из уравнения баланса давления в направлении нормали в каждой точке мениска. Уравнение баланса включало давление поверхностного натяжения, статическое давление металла, гидродинамический напор движущегося металла, динамическое давление флюса и магнитное давление и уравнение свободной поверхности мениска с учетом силового электродинамического воздействия магнитного поля принимало такой вид:

$$\gamma \left[\frac{\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)}{\left(1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right)^{2/3}} \right] + (\rho_m - \rho_f) g (y - h_1) + \frac{\mu}{4} H_t^* H_t + P_a(\delta) - P_a(0) - \mathcal{K}(0, h_1) = 0, \quad (2)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ_m и ρ_f – плотности металла и флюса соответственно; g – ускорение свободного падения; h_1 – высота металла от вершины мениска до точки касания со стенкой гильзы; H_t – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности мениска; μ – магнитная проницаемость жидкого металла, равная магнитной постоянной; P_δ – динамическое давление, возникающее вследствие возвратно-поступательного движения гильзы кристаллизатора; k – кривизна поверхности мениска; x и y – текущие координаты. Далее задача о форме поверхности мениска сводилась к решению задачи Коши для уравнения (2) при предварительно найденных значениях H_t .

Распределение электромагнитного поля в расчетной области, возбуждаемого током индуктора, охватывающего гильзу, определялось на основе решения уравнений Максвелла в приближении высокочастотного поля. Для учета конструктивного исполнения гильзы кристаллизатора с прорезями конечной высоты разработана новая математическая модель электромагнитных процессов гильзы с прорезями, названная магнитно-потокослойной моделью. При разработке этой модели принималось, что величина магнитного поля во внутренней полости гильзы кристаллизатора, возбуждаемого индуктором, определяется магнитной проводимостью прорезей гильзы и полностью, в высокочастотном приближении, экранируется сплошными участками гильзы. Эквивалентная магнитная проницаемость секционированного участка гильзы определялась исходя из геометрических размеров сегментов и прорезей в горизонтальном сечении гильзы. Помимо потоков непосредственно в щелях учитывался магнитный поток в скин-слое. В результате была введена эквивалентная магнитная проницаемость, которая учитывает экранирующие действия сегментов, геометрические размеры прорезей и

их количество. Электрофизические параметры среды при решении задачи о распределении электромагнитного поля задавались в виде $\mu = \mu_{\sigma\delta}$, $\sigma = 0$.

В соответствии с введенной магнитно-потокковой моделью разработана оригинальная методика расчета свободной поверхности жидкого металла под воздействием высокочастотного электромагнитного поля. Методика позволяет кроме формы свободной поверхности мениска определить электрические потери в элементах конструкции гильзы и оптимизировать режимные параметры электромагнитного устройства. В перспективе предложенный метод формирования положительного мениска позволит значительно усовершенствовать процесс непрерывного литья, отказавшись от осцилляций гильзы, а также улучшить качество поверхности непрерывно литых заготовок. Однако реализация предложенного технического решения в настоящее время приостановлено из-за отсутствия надежной технологии изготовления секционированных гильз. Тем не менее, результаты исследований приняты Новокраматорским машиностроительным заводом (ЗАО «НКМЗ») для перспективного проектирования новых типов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Другим видом силового воздействия электромагнитного поля на жидкий металл в процессах литья заготовок является его перемешивание непосредственно в кристаллизаторе. Перемешивание металла в кристаллизаторе позволяет, прежде всего, интенсифицировать теплопередачу через медную стенку гильзы и тем самым, в конечном итоге, увеличить производительность оборудования. Простая и дешевая (на порядок дешевле иностранных аналогов) электромагнитная система для перемешивания металла в кристаллизаторе МНЛЗ была предложена и разработана совместно с НКМЗ [14]. Эта электромагнитная система реализует классический тип движения жидкого металла – азимутальное перемешивание. Эта разработка основывается на том, что вращающееся магнитное поле, в отличие от большинства систем электромагнитного перемешивания, создается за счет вращения магнитной системы постоянных магнитов. Механический вращательный момент создается многополюсной асинхронной электрической машиной, ротором которой является полый цилиндр, на внутренней поверхности которого установлены постоянные магниты. Использование разработанного устройства намечено в одном из ручьев МНЛЗ на Енакиевском металлургическом заводе.

Наряду с разработкой традиционных типов электромагнитных перемешивателей жидкого металла, в отделе электромагнитных систем предложены новые исполнения, отличающиеся иным, не ротационным движением расплава. Такой тип движения позволяет реализовать применение многообмоточных электромагнитных систем. В [7] в электродинамическом приближении получено аналитическое выражение для распределения магнитного поля и плотности тока в цилиндрическом кристаллизаторе многообмоточного электромагнитного перемешивателя жидкого металла в зависимости от величины и характера распределения токовой нагрузки.

При известном конструктивном исполнении обмоток электромагнитного перемешивателя и заданных величинах фазных токов на основе выведенных соотношений представляется возможность определить распределение электродинамических усилий в жидком металле и рассчитать энергетические показатели перемешивателя. Предварительный анализ электродинамических усилий показал, что использование трех обмоток позволяет создать такой вид течения, при котором в движение периодически вовлекаются центральные области жидкой лунки. Детальный анализ возникающих течений необходимо выполнить с учетом металлургических эффектов.

В 2008 году получили дальнейшее развитие теория и методы расчета силового действия магнитного поля на движущуюся проводящую среду. Методы расчета линейных электромагнитных систем нашли приложение в системах динамического торможения на постоянных магнитах [1]. Разработанные системы динамического торможения применяются в развлекательных аттракционах, серийно производимых винницким заводом «Аналог». В 2008 году запущен в эксплуатацию экстремальный аттракцион «башня свободного падения Магнетик XXL» высотой 50 м, длиной свободного падения 22 м и предельным весом снаряженного (с пассажирами) экипажа 7500 кг. Скорость «приземления» экипажа составляет 0,3...0,4

м/с. Удельные показатели системы динамического торможения превосходят показатели известных аналогов российского производства более чем в 1,8 раза.

Тормозные системы, основанные на использовании идеи динамического торможения линейных магнитных систем с постоянными магнитами, могут быть использованы также в системах безопасности лифтов. Не исследованными остаются также вопросы термического воздействия поля магнитных систем постоянных магнитов на движущиеся проводящие среды. Перспективность этих исследований очевидна из-за ожидаемых высоких энергетических показателей таких систем.

Электроразрядные процессы. Традиционным направлением научных исследований отдела электромагнитных систем является изучение электроразрядных процессов в конденсированных средах и разработка на их основе электротехнологий.

Среди электротехнологий одной из самых потенциально привлекательных остаётся электроразрядная очистка воды. Наиболее давней и соответственно наиболее разработанной является технология, основанная на озонировании воды с производством озона в барьерном разряде. Однако как этот, так и два другие основные виды обработки, связанные с разрядами на поверхность воды и разрядами в воде, связаны с большими затратами электроэнергии. В связи с этим задача сводится к поиску таких видов, форм и организации разрядов, при которых энергия разряда максимально расходовалась бы на основной процесс – обеззараживание и/или очистку воды. В свою очередь, среди подводных разрядов есть вид – диафрагменный разряд, обладающий, как показали изложенные ниже результаты исследований, более широким диапазоном и более мягким регулированием параметров. Это позволит получить необходимые для процесса обработки воды химически активные частицы, а не высокоэнергетичные составляющие плазмы линейных подводных разрядов, забирающих основную энергию разрядов и непродуктивно участвующих в процессе очистки.

Ниже излагаются результаты начального этапа исследований диафрагменного разряда, направленных на выяснение внешних (факельных) проявлений разряда как явления, его электрических параметров и возможности получения положительного эффекта для очистки воды.

Диафрагменный разряд (ДР) – разряд в небольшом отверстии тонкой диэлектрической диафрагмы, разделяющей два объема воды, на которые подаётся импульсное напряжение. Факельные образования (каналы) такого разряда распространяются по обе стороны диафрагмы от отверстия в глубину объёмов воды. Это определило и технику исследований. Разряд осуществлялся в заполненном водой прозрачном сосуде, разделенном стеклотекстолитовой перегородкой (диафрагмой) толщиной $b = 0,48$ мм с отверстием диаметром $d = 0,5$ мм. Electroдами служили медные стержни диаметром 4 мм, установленные параллельно перегородке на расстоянии друг от друга $l = l_a + l_k + b = 20$ мм. Здесь l_a , l_k – расстояния от анода и катода до перегородки соответственно. Вид факелов разряда фиксировался цифровым фотоаппаратом. Влияние электропроводимости жидкости на разряд изучалось на водопроводной воде с $\sigma = 5,5 \cdot 10^{-5}$ См/см и растворах NaCl: 5-ти миллинормальном (5 мн.) с $\sigma = 6 \cdot 10^{-4}$ См/см и 5-ти сантинормальном (5 сн.) с $\sigma = 5,5 \cdot 10^{-3}$ См/см. Исследование химической эффективности обработки воды разрядом проводилось в 1 %-ном водном растворе метиленового голубого красителя (метиленовая синь), в сточной воде шламонакопителя и в 1 %-ном водном растворе йодистого калия KI.

Факельные образования и осциллограммы напряжений и токов диафрагменного разряда имеют существенные особенности по сравнению с таковыми других видов разрядов под водой, таких как линейные и коронные разряды на металлических электродах [6, 9, 10, 12]. Эти данные позволили установить ряд свойств ДР как физического явления. В частности, совместно с приводимыми ниже расчётами можно сделать выводы о природе его возникновения.

Согласно существующим физическим представлениям, начало ДР связано с образованием паров воды в отверстии диафрагмы и последующим их электрическим пробоем. Однако результаты экспериментов в настоящей работе позволяют сделать качественные выводы о другом механизме формирования ДР.

Начальный ток между электродами соответствует геометрическим параметрам разрядного промежутка и электропроводности среды. Электрическое сопротивление отверстия в диафрагме диаметром d и длиной b составляет $R_{омв} = 4b/(\pi d^2 \sigma)$. Сопротивление воды (как полупространства с одной стороны диафрагмы) относительно среза этого отверстия будет $R_в = 1/(2d\sigma)$. Сопротивление цилиндрического электрода радиусом a и длиной l относительно воды составляет $R_э = [\ln(2l/a - 1)]/(2\pi l\sigma)$. Таким образом, суммарное сопротивление между электродами $R_{мэ} = R_{омв} + 2R_в + 2R_э$. Начальный ток в отверстии $I_n = U/R_{мэ}$, где U – приложенное к электродам импульсное напряжение. Плотность начального тока в отверстии диафрагмы $J_n = 4I_n/\pi d^2$. Мощность разряда в отверстии $P_{омв} = I_n^2 R_{омв}$. Начальная напряженность электрического поля в отверстии $E_n = J_n/\sigma$. Время испарения воды в отверстии составляет $t_u = Q_u/P_{омв}$, где $Q_u = q_u m$ – энергия испарения воды в отверстии; q_u – удельная энергия испарения воды, имеющей начальную температуру 20 °С; m – масса воды в отверстии.

Расчеты по этим зависимостям показали, что для водопроводной воды 5 мн. и 5 сн. растворов значения времени испарения воды в отверстии t_u равны соответственно 1200, 105 и 12 мкс. Реальное время формирования разряда, судя по осциллограммам тока [10, 12], для водопроводной воды составляет ~ 40 мкс. Столь значительное отличие t_u от реального времени поджига разряда указывает на то, что предположения о ведущей роли испарения жидкости в иницировании ДР в водопроводной воде не соответствуют действительности. Обращает на себя внимание и то, что напряженность электрического поля на начальной стадии разряда достигает значения ~ 160 кВ/см, которое в несколько раз превышает напряженность начала ионизации воды. Поэтому наиболее вероятно, что пробой начинается из образования нитеобразного канала на краю отверстия, где электрическая прочность имеет меньшее значение, чем в центре. На это косвенно также указывает малая величина всплеска тока и напряжения на осциллограммах при поджиге разряда [10, 12]. О нитеобразном стримерном характере канала пробоя свидетельствуют и снимки разряда. На перпендикулярных к диафрагме снимках видно, что при больших диаметрах отверстия ($d = 1,5...2$ мм) разряд привязан к краю отверстия, и продукты разряда даже на более поздних стадиях разряда не заполняют всего сечения отверстия [9, 11]. Литературные данные подтверждают, что разряд начинается одновременно во многих точках по периметру отверстия. Заполнение отверстия плазмой происходит в процессе развития разряда, и при энергии разряда ~ 7 Дж оно полностью заполняется при диаметре $d \leq 1$ мм.

Определение химической эффективности диафрагменного разряда производилось в камере, корпусом которой служил цилиндр из нержавеющей стали диаметром 60 мм. На оси цилиндра располагался электроизолированный стержень диаметром 10 мм, покрытый стеклотекстолитовой или фторопластовой изоляцией толщиной 2 мм. В изоляции были сделаны восемь отверстий диаметром 1,2 мм. Корпус камеры был заземлен, а на стержень подавалось импульсное напряжение положительной полярности от высоковольтного источника. Общая импульсная энергия, вводимая в камеру при амплитуде напряжения ~ 13 кВ, составляла ~ 8 Дж при частоте следования импульсов 1...10 Гц. Эффективность воздействия ДР на метиленовую синь и сточные воды выявлялась по изменению показателя рН, химического потребления кислорода (ХПК) и относительной прозрачности жидкости А, определяемых по стандартным методикам. Показателем эффективности обработки раствора КІ служила масса выделенного йода, измеряемая путем титрования раствора тиосульфатом натрия.

Результаты опытов (см. таблицу) показали, что заметные изменения параметров растворов наступают при превышении некоторого уровня удельной объемной энергии w , вкладываемой в жидкость. Для раствора № 1 $w \sim 10$ Дж/см³. При такой удельной энергии значения рН и А остаются почти неизменными, а ХПК снижается на 10 %. Увеличение энерговклада до $w = 286$ Дж/см³ снижает ХПК более чем на 50 %, повышает почти вдвое прозрачность А и увеличивает рН на 10 %. Удельные энергозатраты для очистки сточной воды (раствор № 2, табл.) должны быть еще выше, так как при $w = 280$ Дж/см³ ХПК уменьшается только на 35 %, а рН и А изменяются мало.

Полученные результаты по обработке диафрагменным разрядом раствора № 1 можно сопоставить с литературными данными по обесцвечиванию подводным коронным разрядом 0,01 %-ных растворов роданина, оранжевого метила и др. Сравнение показало, что двукратное увеличение прозрачности растворов требует примерно такого же энергозатрата $w \sim 280$ Дж/см³. Однако если учесть, что в наших исследованиях исходная концентрация раствора № 1 была на два порядка выше, то можно утверждать, что эффективность обесцвечивания диафрагменным разрядом если и не на два порядка, то, по крайней мере, существенно больше, чем у подводного коронного. Известно, что подача в зону подводного коронного разряда кислородсодержащего газа увеличивает химическую эффективность разряда, в частности, содержание растворенного в воде озона. Исследования в данной работе показали, что это свойство присуще и ДР. Эксперименты проводились на установке с диафрагмой, в которой было одно отверстие диаметром 1,2 мм. Через это отверстие осуществлялась прокачка воздуха (~ 1 л/мин). Обработываемой жидкостью служил 1 %-ный раствор KI. Химическая эффективность ДР определялась по массе йода m_1 , выделившегося при разряде в результате протекания совокупности всех возможных окислительных реакций. Из таблицы видно, что при почти одинаковых энергозатратах ($w \sim 90$ Дж/см³) подача воздуха на порядок снижает удельные энергозатраты на выделение йода w_1 . Это указывает на целесообразность использования продувки воздуха через зону ДР.

№ раствора	Тип раствора	w , Дж/см ³	До обработки			После обработки			w_1 , Дж/мг	C_3 , мг/л
			pH	XПК, мг/л	A, %	pH	XПК, мг/л	A, %		
1	1%-ный раствор метиленовой сини	10,8	3,75	670	35	3,75	613	33	-	-
		286	4,35	670	35	8,2	291	58	-	-
2	Сточные воды	187	8,35	2524	6	9	1738	5	-	-
		280	8,35	2524	6	9,1	1640	4,5	-	-
3	1%-ный раствор KI	85	-	-	-	-	-	-	$1,25 \cdot 10^4$	7,2
	1%-ный раствор KI с продувкой воздухом	90	-	-	-	-	-	-	$1,2 \cdot 10^3$	80

Можно также отметить следующее. Если предположить, что выделение йода происходит в результате только одной реакции $O_3 + 2 \cdot KI + H_2O \rightarrow I_2 + 2 \cdot KOH + O_2$ вследствие образования при разряде озона, то по результатам титрования можно определить некую "эквивалентную" концентрацию растворенного в воде озона C_3 . При разряде с продувкой воздуха она достигает внушительных значений $C_3 = 80$ мг/л (таблица).

Таким образом, начальный этап исследований ДР показывает, что диафрагменный разряд обладает способностью положительно влиять на электроразрядную обработку воды и как электроразрядное явление в целом обладает особенностями, которые необходимо учитывать при использовании его в электротехнологических процессах.

Другим перспективным способом очистки воды является использование для этих целей импульсного коронного разряда на поверхность воды. За счет использования этого вида разряда можно достичь существенного снижения удельных энергозатрат по сравнению с другими видами разрядов, в частности, с коронным разрядом постоянного тока [2]. Достоинствами такой технологии обработки воды также является ее упрощение, обусловленное возможностью исключения из технологической линии устройств осушки воздуха и растворения озона в обрабатываемой жидкости, как это требуется в устройствах озонирования воды. К достоинствам обработки воды импульсным коронным разрядом относятся и то, что при нем поверхность жидкости подвергается воздействию сильного электрического поля и высокоэнергетичных заряженных частиц. При этом энергетическая эффективность и степень очистки воды увеличиваются, в частности, за счет генерации очень активных частиц OH, а также перекиси водорода H_2O_2 , служащей катализатором многих окислительных

реакций. Помимо этого использование надводного разряда позволяет получить дополнительный положительный эффект, связанный с отсутствием при таком разряде загрязнения обрабатываемой жидкости продуктами эрозии электродов. Не менее важным аргументом в обосновании применения надводных электрических разрядов для очистки воды является и то, что электродные системы для их осуществления проще, надежнее и обладают намного большим ресурсом использования, чем подводные.

Для практической реализации преимуществ обработки воды импульсным коронным разрядом на ее поверхность нами были начаты исследования электрофизических характеристик импульсного коронного разряда на поверхность электропроводящей жидкости, а также химической эффективности такого разряда по очистке воды. С этой целью был разработан экспериментальный стенд, включающий в себя высоковольтный импульсный источник питания, разрядную камеру и устройства для диагностики электрических, оптических и спектральных параметров разряда.

Источник питания обеспечивает импульсы с амплитудой до 40 кВ, длительностью 10^{-7} – 10^{-5} с и частотой следования до 3 кГц. Разрядная камера позволяет вести исследования импульсной короны на неподвижную и движущуюся жидкость, а также создавать на ее поверхности «псевдокипящий» слой, который на порядок увеличивает поверхность жидкости, что способствует увеличению эффективности ее обработки.

Выполнены первые исследования импульсного коронного разряда на поверхность различных видов водных растворов (дистиллированная, водопроводная, сточная и др. воды), показавшие существенные изменения их химического состава под действием разряда.

В настоящее время все более широкое распространение получают энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии. Среди них наиболее распространены ветроэнергетические и фотоэлектрические установки. Мощность этих источников энергии непостоянна: в течение суток она может изменяться от максимального значения до нуля. Нужная стабильность работы устройств возобновляемой энергетики может быть достигнута путем использования сверхпроводящих индуктивных накопителей электроэнергии (СПИН), обладающих рядом преимуществ перед другими устройствами аккумулирования энергии. Однако СПИН обладают низкой удельной энергией (~ 10 кДж/кг и $\sim 1 - 10$ МДж/м³), что делает неприемлемо высокой для многих потребителей стоимость единицы установленной мощности СПИН и единицы запасаемой в нем энергии. В связи с этим возникает актуальная задача разработки СПИН с повышенными технико-экономическими показателями.

Поисковые научные исследования в указанном направлении в 2008 г. выполнялись в рамках темы “Энергоэффективность” совместно с отделом теоретической электротехники. Цель исследования – снижение расхода обмоточного провода и объема материала механической удерживающей системы путем уменьшения электродинамических сил, воздействующих на обмотку, и оптимизации их распределения. В 2008 г. изучалась магнитная система в виде тороидального соленоида с наклонными катушками [3, 4, 13].

Дальнейшие исследования в области магнитных систем СПИН с повышенными технико-экономическими показателями предполагается вести в следующих направлениях.

1. Разработка математической модели, исследование и оптимизация параметров тора с наклонными катушками при соизмеримых значениях большого и малого радиусов тороидальной магнитной системы.

2. Создание математических моделей и исследование новых конфигураций интегрально разгруженных тороидальных магнитных систем с пониженным уровнем рассеяния.

1. *Архипов А.В., Кондратенко И.П., Рацепкин А.П.* Динамическое торможение односторонней линейной машины с постоянными магнитами // Техн. электродинаміка. – 2008. – №1. – С. 36–41.
2. *Божко И.В., Фальковский Н.И.* Влияние движения воздуха на генерацию озона положительной стримерной короной // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С.92–93.
3. *Васецкий Ю.М., Аристов Ю.В.* Магнитная система в виде тонкого тора с наклонными катушками: аналитическая модель, магнитные поля // Техн. электродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 9–15.

4. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Аристов Ю.В.* Параметры сверхпроводящих тороидальных магнитных систем малого поперечного сечения с наклонными катушками // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2008. – Ч. 4. – С. 3–6.
5. *Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.* Индуктор бегущего магнитного поля для нагрева ферромагнитных лент // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 66–73.
6. *Гончарук В.В., Божко И.В., Фальковский Н.И. и др.* Диафрагменный разряд и его использование для очистки воды // Химия и технология воды. – 2008. – Т.30. – №5. – С. 463–477.
7. *Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.* Расчет электромагнитного поля в цилиндрическом кристаллизаторе многообмоточного электромагнитного перемешивателя жидкого металла // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 4.
8. *Кондратенко И.П., Петухов И.С., Ращепкин А.П.* Моделирование электромагнитного воздействия на мениск жидкого металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 5. – С. 62–67.
9. *Фальковский Н.И.* Феноменологические особенности диафрагменного разряда // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 1.
10. *Фальковский Н.И., Божко И.В.* Плазменные факелы и электрофизические параметры диафрагменного разряда в воде // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. – Вып.7. – С. 127–131.
11. *Fal'kovskii N.I.* Phenomenological Features of Diaphragm Discharge // High Temperature. – 2009. – Vol. 47. – №1. – P. 22–26.
12. *Falkovsky N.I., Bozhko I.V.* Plasma Torches and Electrophysical Parameters of the Discharge in Water // Technical Physics. – 2008. – Vol. 53. – № 7. – P. 943–947.
13. *Vasetsky Y., Mazurenko I., Aristov Y.* Thin Toroidal Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) with Tilted Coils: Dimension and Mass Parameters, Stray Magnetic Fields // IEEE 9th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”. Alushta (Crimea), Ukraine, September 16–20, 2008. – P. 30–32.
14. *Пат. № 81579.* Пристрій для електромагнітного перемішування / І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін, Ю.М. Белобров та інші.