

И.В. Божко, И.П. Кондратенко, А.П. Рашепкин, Н.И. Фальковский

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Висвітлено основні наукові напрямки досліджень відділу електромагнітних систем. Викладено сутність досліджень та наведено основні наукові результати, отримані в 2009 р.

Представлены основные научные направления исследований отдела электромагнитных систем. Изложена суть исследований и приведены основные научные результаты, полученные в 2009 г.

Электромагнитные устройства для перемешивания жидких металлов. Для повышения качества непрерывно-литой стали, а также для улучшения ее чистоты по неметаллическим включениям, улучшения кристаллической структуры заготовки, подавления ликвационных дефектов и пористости применяют методы электромагнитного воздействия, обеспечивающие перемешивание жидкой фазы заготовки непосредственно в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Известные устройства для перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ выполняются в виде асинхронной двухполюсной электрической машины с электропитанием от трехфазного (иногда двухфазного) преобразователя низкой (3...10 Гц) частоты. Для достижения металлургического эффекта скорость движения жидкого металла на фронте кристаллизации должна составлять величину порядка 1 м/с, что в свою очередь достигается при величине индукции магнитного поля на внутренней поверхности гильзы кристаллизатора порядка 0,1 Тл. При создании такого магнитного поля во внутренней полости магнитопровода с немагнитными промежутками, равными внутреннему диаметру магнитопровода, для проведения магнитного потока требуются большие токовые нагрузки обмотки. Это обеспечивается за счет большой мощности источника питания. При работе устройства лишь незначительная часть этой мощности используется собственно на перемешивание металла, а большая часть мощности затрачивается на тепловые потери в обмотках.

Для снижения эксплуатационных затрат на перемешивания металла предложено устройство, в котором возбуждение магнитного поля обеспечивается системой постоянных магнитов [12]. В его состав входит двухполюсная магнитная система, выполненная в виде пары магнитов, закрепленных на внутренней поверхности полого цилиндрического корпуса, установленного вертикально в подшипниковых опорах и вращающаяся в азимутальном направлении.

В работе [5] разработан метод расчета электромагнитного поля, электродинамических усилий и скорости движения жидкого металла в гильзовом кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок с использованием постоянных магнитов. Разработанный метод расчета позволяет обосновать конструкцию перемешивателя и выбрать необходимое количество активного материала – магнитов из сплава NdFeB. Разработанные магнитные системы могут использоваться как в зоне первичного охлаждения МНЛЗ (кристаллизатор), так и в зоне вторичного охлаждения.

Точный расчет поля в области жидкого металла перемешивателя достаточно сложен, так как требует решения уравнений магнитной гидродинамики. Сечение литой заготовки стали имеет зачастую прямоугольную форму, что создает серьезные затруднения в расчетах и требует использования численных методов анализа, которые, кроме того, могут быть использованы лишь при разработке конкретно заданного исполнения перемешивателя. Поэтому в работе [7] на примере электромагнитного перемешивателя с обобщенной обмоткой установление функциональных зависимостей выполнено на основе исследования лишь элект-

ромагнитных процессов в цилиндрическом кристаллизаторе. Электромагнитное поле в перемешивателе жидкого металла описывается системой уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t, \quad \operatorname{div}\mathbf{j} = 0, \quad (1)$$

и материальными уравнениями

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (2)$$

где $\mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{j}$ – векторы электромагнитного поля; \mathbf{v} – скорость движения среды; σ и μ – ее электропроводность и магнитная проницаемость.

Для решения системы уравнений (1) предполагается, что μ, σ постоянные для каждой области и существует только z -составляющая плотности тока. Тогда система (1) для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A}$) с использованием кулоновской калибровки $\operatorname{div}\mathbf{A} = 0$ сводится к уравнению вида

$$\Delta\mathbf{A} = \sigma\mu\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} - \sigma\mu(\mathbf{v} \times \operatorname{rot}\mathbf{A}). \quad (3)$$

Полагалось, что обмотка электромагнитного перемешивателя может включать несколько отдельных обмоток со своим электропитанием и витками, но ток во всех обмотках изменяется по гармоническому закону и, следовательно, векторный магнитный потенциал также изменяется во времени по гармоническому закону. Тогда векторное уравнение (3) для комплексных амплитуд векторного магнитного потенциала в цилиндрических координатах сводится к одному уравнению:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial A_z}{\partial\rho} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho^2} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 A_z}{\partial\varphi^2} - i\mu\sigma\omega A_z + \sigma\mu(v_\varphi\frac{1}{\rho}\frac{\partial A_z}{\partial\varphi} + v_\rho\frac{\partial A_z}{\partial\rho}) = 0. \quad (4)$$

Полученное в электродинамическом приближении аналитическое решение уравнения (4) позволяет получить картину распределения составляющих электромагнитного поля и электродинамических сил 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.

Разработана методика расчета электродинамических сил, которая учитывает конструктивное исполнение перемешивателя и затухание электромагнитного поля в элементах конструкции. Выполнены численные эксперименты по оценке распределения электродинамических сил в жидком металле под действием трех обмоток. Одна из них является двухполюсной и характерной для большинства классических электромагнитных перемешивателей, а две другие выполнены по типу «дугостаторных», причем последовательное их соединение эквивалентно четырехполюсной обмотке.

В статье [6] получило теоретическое подтверждение обнаруженное ранее явление поливихревого течения жидкого металла [11], которое продемонстрировано на рис. 1, заключающееся в выносе жидкого металла из осевой зоны кристаллизатора на периферию, где наблюдается наиболее интенсивное движение.

Представленная на рис. 1 картина распределения объемных усилий в металле существенным образом зависит от соотношения витков двух- и четырехполюсной обмоток. Количество же силовых вихрей равно сумме пар полюсов применяемых обмоток. Например, четыре вихря возникают, если используется двух- и шестиполюсная обмотки, создающие встречно вращающиеся поля и т.д.

Маловероятным представляется, что движение жидкого металла в кристаллизаторе будет повторять приведенное на рис. 1 распределение усилий. Вынос металла из осевой зоны, вероятно, будет происходить за счет неустойчивости движения.

Между тем, путем комбинирования двухполюсной и одной дугостаторной обмоток, создающих встречное движение магнитных полей, представляется возможным обеспечить

одностороннее движение жидкого металла через осевую зону слитка, показанное на рис. 2. Такое распределение сил будет способствовать интенсификации процессов тепло-массопереноса, выносу металла из осевой зоны, что позволит снизить осевую пористость слитка и повысить его качество.

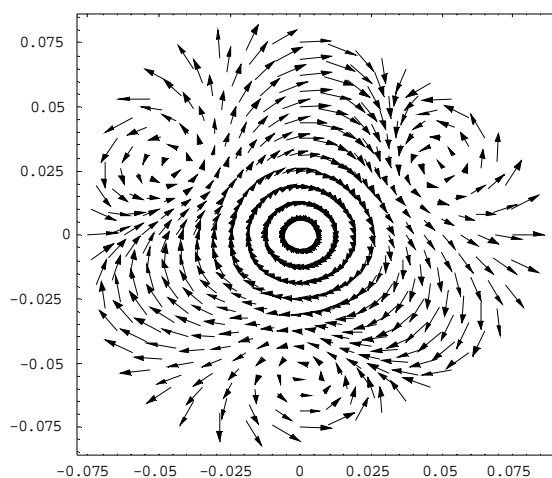


Рис. 1

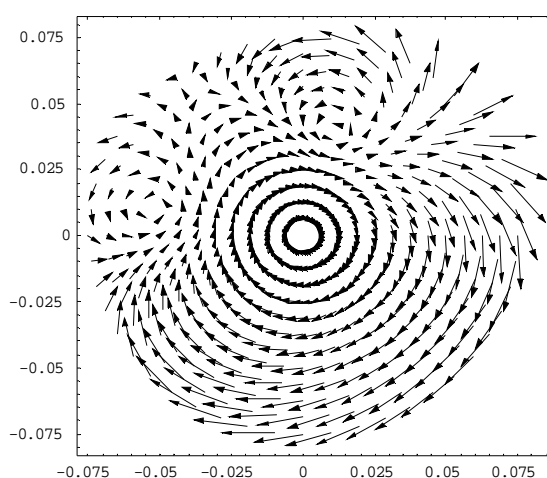


Рис. 2

В работе определены токовые нагрузки круговой и двух дугостаторных обмоток, а также результирующая токовая нагрузка трехобмоточного перемешивателя. Выведены соотношения для расчета распределения φ и ρ компонент электродинамических усилий в жидком металле для произвольных схем соединения и конструктивного исполнения обмоток.

Использование результатов исследований по электромагнитному перемешиванию жидкого металла выполнено в соответствии с координационным планом исследований с Новокраматорским машиностроительным заводом – отечественным производителем машин непрерывного литья заготовок стали.

Электроразрядные процессы в газах. В области разработки средств, создания устройств и поисков эффективных режимов для электроразрядной обработки воды в настоящее время основные усилия в отделе направлены на изучение технологических возможностей в этом направлении импульсного стримерного коронного разряда (ИКР). Общей целью работ является достижение производительности по озону O_3 в коронном разряде (КР) такого же или более высокого значения, чем в высокочастотном барьерном разряде (БР). Барьерный разряд, как известно, является в настоящее время единственным промышленным электроразрядным средством производства озона O_3 для озонирования воды. Этот технологический процесс по ряду причин дорогостоящий, тогда как использование коронного разряда технологически существенно проще и соответственно значительно дешевле. Однако пока в известных устройствах коронного разряда по производительности озона он уступает барьерному разряду. Производство озона как в коронном, так и в барьерном разрядах обусловлено наличием стримеров с особенностями их плазменной и геометрической структуры. Считается, что решающую роль в процессе производства озона играет головка стримера с напряжённостью поля в ней в области 26...30 кВ/см и больше. В неравновесной плазме, образовавшейся в таких условиях и при таких полях, происходят процессы образования озона. Стримерные системы КР постоянного и импульсного напряжений несколько отличаются. Однако КР постоянного напряжения проще в реализации. Кроме того, перспективным представляется и импульсный подводный диафрагменный разряд [8, 13].

Проведенные исследования озонирования воды на постоянном напряжении [3] показали, что количество растворённого в воде озона составляет примерно половину от общего количества озона, генерируемого разрядом. Удельные энергозатраты на получение 1 г растворённого в воде озона составляют около 0,11 кВт·ч/(г·м³), что несколько уступает энерге-

тической эффективности барьерного разряда. Такой результат был получен с помощью многоигльчатого анода специальной конструкции [3], позволявшего увеличивать среднюю напряжённость электрического поля в разрядном промежутке. Был разработан и одноигльчатый электрод [10], обеспечивающий значительный объем факельного образования КР, в котором генерируются химически активные частицы. Такой электрод может обеспечивать более чем на порядок больший объем факела по сравнению с факелом классической коронирующей иглой. Однако возможность генерирования в нем химически активных частиц O_3 , OH , H_2O_2 , необходимых для обработки воды, требует дополнительных исследований.

Импульсный коронный разряд привлекателен тем, что благодаря кратковременности процесса позволяет получить в импульсном стримере большие удельные энергии при больших напряжённостях электрического поля в головке. Учитывая перспективность ИКР для озонирования воды, исследования его начаты в отделе в 2009 г. [8].

Экспериментальная установка состоит из импульсного источника напряжения, разрядной камеры, средств диагностики, а также устройств для прокачки воздуха, озонируемой воды и др. Импульсный источник питания построен на основе заряда конденсатора через сопротивление от источника постоянного напряжения U_0 с последующим его разрядом на сопротивление и разрядную камеру РК. В качестве быстродействующего коммутирующего элемента используется газонаполненный управляемый разрядник. Разрядная камера представляла собой прозрачный цилиндр из кварцевого стекла. Анод диаметром 60 мм содержал 230 игл для коронирования. Катодом служила обрабатываемая жидкость, толщина слоя которой задавалась высотой выдвижного сливного патрубка. Расстояние между иглами и их высота составляли 4 мм. Для увеличения площади контакта разряда с поверхностью обрабатываемой жидкости и лучшего её перемешивания с помощью продуваемой воздухом пористой керамической трубки создавался “псевдокипящий слой”.

Для записи осциллограмм полного тока через межэлектродный промежуток $i(t)$ и напряжения на нем $U(t)$ использовались приборы фирмы Tektronix: цифровой двуканальный осциллограф TDS1012 с полосой пропускания 100 МГц, индуктивный датчик тока P6021 и делитель напряжения P6015.

Электрическая схема обеспечивала импульсы напряжения с амплитудой до 30 кВ, фронт которых составлял 20...30 нс. Могли изменяться длительности импульсов $\tau_u = 10^2 \dots 3 \cdot 10^3$ нс, частоты их следования $f_u = 3 \cdot 10^1 \dots 2 \cdot 10^3$ Гц, энергии импульсов $W_u = 1 \dots 100$ мДж и др. Энергия импульса находилась численным интегрированием

$$W_u = \int_0^{\tau_u} U(t) i_k(t) dt, \quad (5)$$

где $i_k = i(t) - i_c(t)$ – ток коронного разряда. Величина $i_c(t)$ – емкостный ток через разрядный промежуток. Он определялся по выражению

$$i_c(t) = C_s \frac{dU(t)}{dt}, \quad (6)$$

где C_s – емкость электродной системы (~ 10 нФ).

Для изучения электрофизических характеристик ИКР использовалась вода с различной удельной электропроводимостью: дистиллированная ($2 \cdot 10^{-6}$ См/м), водопроводная ($5,5 \cdot 10^{-5}$ См/м) и 5 %-ный водный раствор NaCl ($6,7 \cdot 10^{-2}$ См/м). Исследования проводились на открытом воздухе и в разрядной камере при использовании одного и того же многоигльчатого анода. Опыты на открытом воздухе осуществлялись с целью уменьшения влияния на параметры ИКР изменения состава газовой среды за счет генерируемого в разряде озона. При разряде на открытом воздухе, например, при условиях: толщина слоя водопроводной воды $\delta = 10$ мм, воздушный зазор $h = 7$ мм, $f_u = 320$ Гц, $W_u = 54$ мДж, светящиеся нити разряда со всех иглолок имеют примерно одинаковую интенсивность и пересекают весь разрядный промежуток, достигая поверхности жидкости. Это выгодно отличает ИКР от ко-

ронного разряда на постоянном напряжении в подобных условиях [4], при котором яркая светящаяся зона интенсивной ионизации заканчивается вблизи конца коронирующей иглы.

Исследования показали, что в электрической цепи слой воды на поверхности катода выполняет роль балластного сопротивления: чем больше толщина слоя δ и ниже электропроводность воды σ , тем меньше амплитуда тока i_m . Увеличение величины воздушного промежутка h также снижает i_m . Диапазон изменения значений i_m в зависимости от условий разряда ($\delta = 2 \dots 14$ мм, $h = 2 \dots 8$ мм, $\sigma = 2 \cdot 10^{-6} \dots 6,7 \cdot 10^{-2}$ См/м, $U_m = 16 \dots 20$ кВ) составляет 40...170 А. Из этого следует, что амплитуда импульса тока с одной иглы в среднем равнялась 0,2...0,8 А. По сравнению с амплитудой тока положительных стримеров короны постоянного тока [2] эти величины в 5...7 раз выше.

Другой отличительной особенностью ИКР на поверхность электропроводящей жидкости является то, что наличие на катоде даже тонкого слоя воды ($\delta \sim 1$ мм) позволяет существенно уменьшить минимальную длину зазора h , при которой коронный разряд еще не переходит в искровой. Так, например, при импульсе напряжения $U_m \approx 20$ кВ, $\tau_u \approx 150$ нс присутствие на катоде слоя водопроводной воды $\delta \sim 2$ мм способствовало устойчивому горению ИКР при $h = 4$ мм. При отсутствии такого слоя для предотвращения возникновения искры требовалось увеличение h до 10 мм. Это обстоятельство может иметь положительное значение при обработке воды, так как уменьшение воздушного зазора h способствует снижению энергетических потерь в газе, увеличению энергии и стабильности стримеров, замыкающихся на поверхность жидкости.

Изучение ИКР в разрядной камере подтвердили общие закономерности разряда, полученные при исследованиях на открытом воздухе. Они также показали, что при отсутствии продувки воздухом в РК происходит накопление озона, концентрация которого в газе в течение ~ 3 мин достигает установившихся значений 0,1...2 мг/л. Эта величина зависит от параметров разряда. Присутствие в РК озона приводит к снижению на 10...20 % амплитуды импульсов тока i_m .

Измерение концентрации озона в газовой среде разрядной камеры осуществлялось оптически по поглощению ультрафиолетового света в кювете, в которую поступал газ из разрядной камеры. Источником ультрафиолета служила дейтериевая лампа ДДС-30. В работе использовались монохроматор МДР-2 и фотоумножитель ФЭУ-100 со спектральной областью чувствительности 200...800 нм.

Химическая эффективность влияния разряда на жидкости оценивалась на основании изменений цветности, мутности и химического потребления кислорода (ХПК), определяемых по стандартным методикам. Химическая эффективность ИКР по очистке воды определялась при обработке модельных растворов и природной воды. Модельными растворами служили водные растворы фенола C_6H_5OH и гептана C_7H_{16} , которые являются распространенными органическими загрязнителями природных и сточных вод. Исходные концентрации этих веществ в модельных растворах равнялись 300 мг/л. Значение ХПК для модельных растворов определялось по бихроматной окисляемости, для природной воды – по перманганатной окисляемости. В качестве природной воды использовалась вода со скважины (вода №1) и та же вода (вода №2), прошедшая предварительную обработку на станции комплексной водоподготовки.

Обработка жидкостей осуществлялась в разрядной камере при $\delta = 12$ мм, $h = 4$ мм и расходе воздуха 1,5 л/мин, продуваемого в режиме «псевдокипящего слоя». Значения других параметров: энергия импульсов $W_u = 30 \dots 100$ мДж, частота $f_u = 300 \dots 500$ Гц, время обработки разрядом $t_0 = 1,5 \dots 9$ мин.

Основным показателем химической эффективности электроразрядной очистки воды от примесей считается энергетический выход $M_э$ [9, 15]. Эта величина характеризует количество удаленной примеси на единицу израсходованной энергии. Если считать, что при обработ-

ке ИКР уменьшение концентраций фенола и гептана в модельных растворах пропорционально снижению их ХПК, то значение $M_{\text{Э}}$ для этих веществ можно определить по выражению

$$M_{\text{Э}} = \frac{\Delta C V}{f_u W_u \Delta t_o}, \quad (7)$$

где ΔC – изменение концентрации примеси за время обработки Δt_o ; V – объем обрабатываемой жидкости. Из таблицы видно, что время, необходимое для разложения 99 % фенола и полного разложения гептана, равно соответственно 9 и 6 мин. Изменение энергетического выхода по фенолу $M_{\text{ЭФ}}$ в процессе обработки подтверждает известную [9, 15] общую закономерность: чем ниже концентрация примеси в водном растворе, тем ниже энергетический выход при ее разложении разрядом. Так, при больших концентрациях фенола $C_{\text{Ф}}$ (~100 мг/л) энергетический выход $M_{\text{ЭФ}} \sim 20$ г/кВт · ч. При снижении $C_{\text{Ф}}$ до десятков мг/л он падает до ~ 1 г/кВт · ч. Средние энергетические выходы при почти полной очистке растворов от фенола и гептана в условиях описываемых исследований составили соответственно 4,5 и 3,2 г/кВт · ч.

Приведенные в таблице значения $M_{\text{ЭФ}}$ во всем диапазоне изменения концентраций фенола $C_{\text{Ф}}$ в 1,5...2 раза выше, чем те, что были получены в [14] при разложении фенола ИКР в аналогичных условиях и на 10...20 % выше тех энергетических выходов $M_{\text{ЭФ}}$, которые дает озонирование [14] (при энергозатратах на получение озона из осушенного воздуха 18...20 кВт · ч/кг). Поэтому, учитывая также, что при очистке воды посредством воздействия ИКР на ее поверхность нет необходимости в осушителях воздуха и барбораторах для растворения озона, можно утверждать, что предложенный метод по удельным энергозатратам и экономичности является конкурентоспособным традиционному озонированию воды.

Результаты обработки природной воды показывают, что использование ИКР позволяет значительно улучшить ее органолептические показатели (цветность, мутность) и снижает ХПК в 1,7 раза в воде № 1 и в 5 раз в воде № 2. Удельные энергозатраты W_y на такую обработку воды рассчитывались по выражению

$$W_y = f_u W_u t_o V^{-1}, \quad (8)$$

где t_o – полное время обработки. Расчет показал, что значения W_y достигают внушительных величин $W_y \sim 100$ кВт · ч/м³. Для сравнения эти же два вида воды подвергались озонированию, при котором подобные результаты по очистке были получены при меньших энергозатратах $W_y \approx 20$ кВт · ч/м³. Однако даже такие удельные энергозатраты на обработку исследуемой природной воды слишком велики. Для ее очистки необходимо использовать ИКР или озонирование в комплексе с другими методами.

Следует также отметить, что энергетические показатели ИКР по очистке воды можно существенно улучшить за счет добавления в жидкость относительно небольших количеств H_2O_2 , Fe_2SO_4 или NaOH в зависимости от конкретного вида загрязнения [14], оптимизации параметров разряда, разрядной камеры и др. Это должно стать предметом дальнейших исследований.

Таким образом, использование для электродной системы «игла – жидкий катод» импульсного напряжения вместо постоянного позволяет создать условия для достижения положительным стримером поверхности жидкости и увеличить амплитуду тока стримера в 5...7 раз. Наличие на катоде даже тонкого слоя воды (~1 мм) стабилизирует горение импульсного коронного разряда с замыканием стримеров на катод, обеспечивая этим возможность увеличения их энергии.

На примере фенола и гептана показано, что электроразрядная обработка может эффективно использоваться для очистки воды от органических примесей. Энергетический выход по фенолу достигает 20 г/кВт · ч, что выше, чем в известных электроразрядных технологиях и сравнимо с результатами прямого озонирования.

Показатели воды	Раствор фенола					Раствор гептана		Вода № 1			Вода № 2		
	$t_{\text{о}}$, мин					$t_{\text{о}}$, мин		$t_{\text{о}}$, мин			$t_{\text{о}}$, мин		
	0	1,5	3	6	9	0	6	0	3	8	0	3	8
Цветность, град								150	190	102	127	108	75
Мутность, г/л								69	11	10	11,3	9,3	7,4
ХПК, мг О ₂ /л	4600	1200	800	400	3,5	4800	0	680	640	400	80	64	16
С, мг/л	300	78,3	52,2	26,1	2,3	300	0	–					
М _э , г/кВт·ч	–	20,1	2,34	1,18	1,09	–	3,2	–					

1. *Божко И.В., Белинский В.В., Чарный Д.В.* Импульсный коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды // Техн. электродинамика. – 2010. – № 3. – С. 21–27.
2. *Божко И.В., Петухов И.С.* Исследование разрядного промежутка для плазмохимического реактора на положительной стримерной короне // Техн. электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 17–21.
3. *Божко И.В., Петухов И.С., Фальковский Н.И.* Электродная система для разрядных устройств с положительной стримерной короной // Техн. электродинамика. – 2006. – № 3. – С. 9–12.
4. *Божко И.В., Фальковский Н.И.* Коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды // Техн. электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 9–14.
5. *Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.* Электромагнитное перемешивание металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок с использованием постоянных магнитов // Вісн. Кременчуцького ДПУ. – 2009. – Вип. 3(56), Ч. 2. – С. 82–85.
6. *Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.* Метод расчета электродинамических сил в цилиндрических кристаллизаторах под действием комбинированных бегущих полей // Техн. электродинамика. – 2009. – № 5. – С. 56–62.
7. *Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.* Расчет электромагнитного поля в цилиндрическом кристаллизаторе многообмоточного электромагнитного перемешивателя жидкого металла // Техн. электродинамика. – 2009. – № 4. – С. 61–65.
8. *Фальковский Н.И.* Феноменологические особенности диафрагменного разряда // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 1. – С. 26–30.
9. *Яворовский Н.А., Корнев Я.И., Прейс С.В. и др.* Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы – окислители в водовоздушном потоке // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2006. – Т. 809. – № 2. – С. 108–113.
10. *А.с. № 987736 СССР*, Кл. Н 01 Т 19/00, В 03 Т 19/00. Устройство для создания коронного разряда / В.В. Белинский, С.Г. Никитина, Н.И. Фальковский. Оpubл. 1983. Бюл. № 1.
11. *Пат. 77104 Україна*, МПК В22D 11/115, В22D 27/02, H02K 3/28. Спосіб створення полівихрових течій та індукційний перемішувач рідкого металу / А.П. Ращепкін, І.П. Кондратенко, В.І. Дубоделов, В.Ф. Євдокімов, О.А. Кучаєв, Є.І. Петрушенко, Р.Я. Якобше. Заявл. 18.03.2005. Оpubл. 15.08.2005. Бюл. № 10.
12. *Пат. 81579 Україна*, МПК 8 В22D 27/02, H02K 17/04. Пристрій для електромагнітного перемішування металевого розплаву // Л.П. Кочин, В.С. Плугатарь, А.І. Биковський, С.І. Широкоград, Ю.М. Білобров, І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін. Заявл. 13.11.2006; Оpubл. 10.01.2008. Бюл. № 1.
13. *Fal'kovskii N.I.* Phenomenological Features of Diaphragm Discharge / High Temperature. – 2009. – Vol. 47. – № 1. – P. 22–26.
14. *Hoeben W.F.L.M., Velohuzien E.M., Rutgers W.R. and Kroesen G.M.W.* Gas phase corona discharges for oxidation of phenol in an aqueous solution // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – № 32. – L. 133 – L. 132.
15. *Pokryvailo Alex, Wolf Michael, Jankelevich Jefim.* High – power pulsed corona for treatment of pollutants in heterogeneous media // IEEE transactions plasma science. – 2006. – V.34. – № 5. – P. 1731–1743.