

И.В.Божко, канд.техн.наук, Ю.М.Васецкий, докт.техн.наук, Л.В.Городжа, канд.техн.наук, Ю.П.Емен, докт.техн.наук, И.П.Кондратенко, докт.техн.наук, А.Д.Подольцев, докт.техн.наук, А.П.Ращепкин, докт.техн.наук, Н.И.Фальковский, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины. Киев)

Исследования электромагнитных полей и электрофизических характеристик

Представлена ретроспектива развития исследований электрических характеристик гетерогенных систем, бессиловых магнитных конфигураций, а также разработки асимптотических и численных методов расчета в теории электромагнитного поля. Приведена краткая характеристика результатов по разработке теории и методов расчета индукционных систем для термообработки плоского проката металлов. Изложены основные результаты исследований электрических разрядов в газообразных и твердых диэлектриках, проводимых в ИЭД НАН Украины.

Представлено ретроспективу розвитку досліджень електрических характеристик гетерогенних систем, бессилових магнітних конфігурацій, а також розробки асимптотичних та чисельних методів розрахунку в теорії електромагнітного поля. Наведено стислу характеристику результатів розробки плоского прокату металів. Викладено основні результати досліджень електрических розрядів у газоподібних та твердих діелектриках, що проводились в ІЕД НАН України.

Электрические характеристики гетерогенных систем. Теория гетерогенных сред развивается в электротехнике свыше 100 лет. Начало ей было положено в основополагающих работах Дж.К.Максвелла, который первый провел расчет электрических полей и эффективных параметров для некоторых моделей неоднородных сплошных сред. В дальнейшем эта теория развивалась в трудах Релея, Лоренца, Вагнера и других.

Работы по гетерогенным средам приобретали все большее значение в связи с расширением области применения композитных материалов в технике. Поэтому, начиная с 1974 года, в отделе электрофизики преобразования энергии ИЭД НАН Украины были начаты исследования электрических характеристик неоднородных материалов с гальваномагнитными явлениями. В электротехнике и электронике созданию композиционных материалов уделяется большое внимание. Путем всевозможных сочетаний составных элементов и изменением структурного построения неоднородных систем можно создавать композитные материалы с большим разнообразием электрических характеристик, часто не свойственных каждому в отдельности взятому компоненту. Количество разрабатываемых композитов велико, и экспериментальное определение эффективных параметров многокомпонентных систем связано с трудоемкими затратами и технически достаточно сложно выполнимо. Поэтому в отделе основное внимание уделили детальной разработке расчетных моделей и строгости математических построений, что в итоге позволило установить принципиальные положения теории гетерогенных структур и прояснить многие важ-

ные подробности и тонкости гальваномагнитных явлений и процессов в неоднородных средах.

Теоретические исследования электрических полей в неоднородных сплошных средах в отделе развивались по нескольким направлениям в зависимости от структуры сред:

- сплошные среды, содержащие локализованные включения;
- случайно-неоднородные среды в магнитном поле;
- неоднородные среды с регулярной структурой строения при произвольной концентрации включений в магнитном поле.

На начало этих исследований для описания электрофизических характеристик гетерогенных систем широко использовались полуэмпирические теории и оценочные расчеты, основанные на приближениях Фойгта, Рейсса, Хима и других исследователей. Сотрудники отдела В.Ф.Резцов (канд.техн.наук, ныне — член-корреспондент НАН Украины), Ю.М.Васецкий (канд.техн.наук, ныне — докт.техн.наук, вед.научн.сотр. ИЭД НАН Украины), Л.В.Городжа (канд.техн.наук, ныне — отв.секретарь редакции журнала "Технічна електродинаміка") и докт.техн.наук Ю.П.Емен предложили теоретические модели с одно- и двояко-периодическим строением, которые допускают строгое решение краевых задач и позволяют рассчитать средние значения поля и эффективные параметры с приемлемой для теории и практики точностью. Теоретические построения оказались плодотворными и во многом стимулировали исследования в этой области.

Краткая характеристика основных результа-

© Божко И.В., Васецкий Ю.М., Городжа Л.В., Емен Ю.П., Кондратенко И.П., Подольцев А.Д., Ращепкин А.П., Фальковский Н.И., 2007

тов. В отделе электрофизики преобразования энергии изучались трехмерные композиты, помещенные в магнитное поле. В общей постановке эта задача чрезвычайно сложна и вряд ли имеет решение. Для композиционных материалов с малой концентрацией включений, имеющих сферическую или эллиптическую формы, удается рассчитать распределение электрического тока и получить в явном виде тензор эффективной проводимости (Емец Ю.П., Резцов В.Ф.). Неоднородная среда с включениями эллипсоидальной формы обладает физической анизотропией, обусловленной эффектом Холла и геометрической анизотропией при одинаковой ориентации осей эллипсоидов [1, 2]. Основной научный результат заключается в том, что впервые была найдена эффективная проводимость сплошных сред с двумерными и трехмерными неоднородностями, локализованными в пространстве, в средних и сильных магнитных полях и с позиций электродинамики сплошных сред дано строгое объяснение эффекта аномальной проводимости неоднородных сред в магнитном поле.

Для решения полевых задач в гетерогенных структурах в общей постановке был также предложен метод интегральных уравнений, позволяющий установить некоторые основные свойства исследуемых электрических полей и дать приближенное решение отдельных задач (Резцов В.Ф.). Полученное для анизотропной среды интегральное уравнение Фредгольма [3] совпадает по виду с известным в механике уравнением в задаче о кручении брусьев, составленным из различных материалов.

Наряду с композитами, содержащими изолированные включения, в технических приложениях находят применение материалы со случайно неоднородными свойствами. К последним относятся механические смеси и поликристаллы. Электрические свойства таких материалов были изучены Васецким Ю.М. с помощью статистической теории, напоминающей статистическую теорию турбулентности. Предложенный подход к исследованию формирования электрических полей в случайно-неоднородных средах, основанный на анализе средних значений полей в отдельных фазах неоднородной среды, позволил исследовать во взаимосвязи эффективные параметры и электрические поля в двухкомпонентной среде с анизотропной проводимостью, обусловленной эффектом Холла.

Разработанные методы расчета эффективных параметров случайно-неоднородных сред позволили исследовать с единых теоретических позиций как эффективные параметры, так и статистические характеристики электрических полей в средах с эффектом Холла, не накладывая ограничений на уровень флуктуации проводимости, концентрации отдельных фаз и величину магнитного поля [4—6].

Получено точное решение задачи о распределении тока в слоистой проводящей среде, в которой проводимость и параметр Холла принимают раз-

личные значения в последовательно чередующихся ячейках конечных размеров (докт.техн.наук Емец Ю.П.). Расчет электрического поля в такой системе сводится к последовательному решению двух краевых задач Римана для четной двояко-периодической функции [7,8]. Вычисления эффективных параметров показали, что в сильном магнитном поле проявляются аномальные свойства системы. Проводимость уменьшается при увеличении магнитного поля, а параметр Холла насыщается на уровне, определяемом только соотношениями между величинами электропроводности в смежных ячейках. В реальных системах слоистые изменения свойств, например, полупроводников, обычно нарушаются из-за смещения слоев, и имеет место смешанное слоисто-неоднородное распределение зон. Точное аналитическое решение этой задачи методами теории функций комплексного переменного получили Городжа Л.В., Емец Ю.П., канд.физ.-мат.наук Жукова Н.И., докт.физ.-мат.нук Зверович Э.И. [9].

Для теории и практики неоднородных систем большое значение имеют задачи, описывающие электрические поля систем в состоянии перехода металл-диэлектрик, когда образуются кластеры, которые прерывают протекание тока в проводящей среде, или, напротив, в диэлектрике образуют канал, по которому замыкается ток. Этот вопрос был изучен для композиционных материалов, созданных на основе однородных матриц, в которые внедрены включения в виде прослоек и узких лент, образующих регулярную структуру (Городжа Л.В., Емец Ю.П.). Решетка включений произвольно ориентирована по отношению к направлениям векторов внешнего магнитного поля и среднего тока в системе. Такой структурой обладают, например, эвтектические сплавы, используемые в качестве материалов для гальваномагнитных датчиков. Исследования показали, что композиты с подобным строением имеют трехмерную анизотропную структуру, причем тензор эффективной электропроводности армированного материала сложным образом зависит от размеров лент и локального параметра Холла [1,10—16]. В сильных магнитных полях, когда циклотронная частота значительно больше частоты столкновений носителей тока, вследствие эффекта Холла в матрице анизотропия эффективной электропроводности резко возрастает, вызывая аномальное изменение свойств среды в отдельных направлениях. Аналитические вычисления показали, что при направлении внешнего магнитного поля в продольном и поперечном направлениях относительно включений сопротивление композита в окрестности критических параметров решетки, когда средний ток шунтируется неоднородностями, уменьшается по логарифмическому закону.

В дальнейшем проведенные исследования были распространены на гетерогенные матричные системы с двоякопериодическим распределением

включений квадратной формы (Городжа Л.В., Емец Ю.П.). В физике и технике пленочные системы с таким топологическим строением находят широкое применение в устройствах электронного отображения, где их основное преимущество заключается в хорошей воспроизведимости и стабильности электрических характеристик по сравнению с керметными и островковыми пленками. Строгое аналитическое решение полевой задачи удается получить при шахматном порядке распределения включений, когда они представлены диэлектриками, либо имеют электропроводность на многое порядков превосходящую электропроводность матрицы, так что теоретически их можно считать идеальными проводниками. Было установлено, что даже идеально проводящие включения в сильном магнитном поле выступают как диэлектрическая компонента и обтекаются током. Ранее этот эффект был известен для сред с малой концентрацией включений.

Многие задачи, посвященные исследованию двухмерного распределения электрического тока в сплошных неоднородных средах, были эффективно решены с помощью мощного математического аппарата обобщенной краевой задачи Римана с разрывными коэффициентами (этот задача известна также под названиями задачи линейного сопряжения, Римана-Гильберта и другими). Сопоставление различных методов исследования плоских полей показывает, что обращение к теории краевой задачи Римана позволяет проводить расчеты простыми, естественными способами; в итоге удается представить окончательные результаты в компактном и наглядном виде. Более важное преимущество метода краевой задачи Римана состоит в том, что он дает возможность провести полный анализ разрешимости исследуемых задач, т.е. перечислить допустимые классы решений и в явном виде указать условия, при которых они существуют. Приложение математического аппарата теории аналитических функций проводилось в тесном сотрудничестве с математиками государственного университета Белоруссии (Зверович Э.И.) и Казанского государственного университета (Обносов Ю.В.), совместно с которыми был опубликован ряд важных работ [9, 17–20].

Совершенствование методов определения параметров полупроводниковых материалов поставило проблему теоретического исследования электрических полей в образцах различных конфигураций, имеющих тензорную проводимость, обусловленную эффектом Холла. Подобные задачи возникают также при разработке и оптимизации характеристик ряда технических устройств (полупроводниковых датчиков, магниторезисторов и т.д.). Теоретические исследования в этом направлении проводили Городжа Л.В. и канд.техн.наук Стрилько С.И. [13, 21–25]. Были изучены особенности формирования электрических полей полупроводниковых пластин в форме колец, полос, пря-

моугольников, эллипсов и кругов с анизотропной проводимостью вследствие эффекта Холла. Анализ интегральных характеристик полупроводниковых образцов различной конфигурации во внешнем магнитном поле позволил на основе решения полевых задач установить интегральные соотношения между формой, размерами пластин и измерительных электродов и электрофизическими характеристиками материалов. Были разработаны способы неразрушающего контроля проводимости и параметра Холла полупроводниковых пленок по измерению распределения электрического потенциала на их граничной поверхности.

Математический расчет электрических полей сводился к граничным условиям краевой задачи Гильберта с разрывными коэффициентами, где в качестве аналитических функций выступают комплексные векторы напряженности электрического поля и плотности тока. Общий метод решения полевой задачи Гильберта состоит в сведении ее к краевой задаче Римана путем конформного отображения исследуемой структуры на круг или полуплоскость с последующим аналитическим продолжением комплексных функций на всю плоскость комплексного переменного. Развитые приемы вычислений позволили провести расчеты электрических полей для многих систем в замкнутой форме.

Были исследованы локальные и интегральные характеристики кусочно-однородной двухкомпонентной среды со структурой шахматного поля, рассматриваемой как точно разрешимая модель плоских изотропных гетерогенных систем с равной концентрацией компонентов (Емец Ю.П.). Система в целом изотропна, и независимо от направления протекания внешнего тока в "светлых" и "темных" клетках выделяется одинаковая джоулева энергия [18, 26–28]. Системам такого типа присущи преобразования симметрии, позволяющие свести расчет электрического поля к разрешимому случаю трехэлементной краевой задачи Римана. Явное решение полевой задачи в замкнутой форме раскрывает особенности поведения средних характеристик системы с критическим составом с гальваномагнитными процессами.

Один из принципиальных вопросов теории дисперсных смесей при исследовании физических полей состоит в корректном учете влияния включений друг на друга. В реальных гетерогенных средах эта проблема осложняется различием форм и размеров включений, разнообразием образуемых ими структур, отличием свойств материалов составных компонентов и несущей фазы. В совокупности всего многообразия действующих факторов расчеты полей в неоднородных средах удается осуществить только при ряде допущений. В плане выполнения этой программы в отделе были подробно исследованы модельные задачи с цилиндрическими включениями эллиптической формы во внешнем магнитном поле (Емец Ю.П.). Для учета взаимного влияния включений друг на друга в точ-

ной постановке решена задача об определении электрического поля в проводящей среде, содержащей два произвольным образом расположенных круговых включения, электрические сопротивления и радиусы которых различны; во всех трех компонентах проявляется эффект Холла. Решение задачи получено эффективными методами теории функций комплексного переменного без каких-либо ограничений на исходные условия [19,20, 29, 30]. В силу известной аналогии уравнений физического поля сходным образом изучаются тепловые, диффузные, магнитные, гидродинамические и другие поля. В общей постановке была изучена также неоднородная система, содержащая диэлектрические цилиндры, внутри которых неконцентрически помещены другие диэлектрические цилиндры (Емец Ю.П., докт.физ.-мат.наук Обносов Ю.В., Онофрийчук Ю.П.).

В теории гетерогенных сред наименее изученными остаются многокомпонентные системы, когда в основной фазе имеется не один, а несколько видов включений, которые различаются физическими свойствами и размерами. В аналитическом виде были определены эффективные параметры трехкомпонентной диэлектрической среды с двойкопериодическим расположением параллельных цилиндров двух разновидностей в однородной матрице (Емец Ю.П.). Задача имеет точное решение и в случае плотной упаковки включений [31, 32]. Аналогично была исследована четырехкомпонентная система с гексагональной структурой. В многокомпонентных диэлектрических структурах разнообразны поляризационные явления и в некоторых случаях векторы поляризации в разнородных включениях могут иметь противоположные направления, взаимно компенсируя друг друга. Эффективная диэлектрическая проницаемость у таких систем равна проницаемости матрицы. Для двухкомпонентных систем такие условия принципиально не осуществимы.

Изучение характеристик многокомпонентных сред позволило вывести общие соотношения взаимности и преобразования симметрии, известные ранее в узкой формулировке для двухкомпонентных структур (Емец Ю.П.). Важность указанных соотношений состоит в том, что они, имея высокую степень общности, позволяют контролировать правильность и точность вычислений эффективных параметров при численных расчетах и приближенных вычислениях [33].

Бессиловые магнитные конфигурации. В 1982 году отдел электрофизики преобразования энергии обратился к изучению магнитных систем, построенных по принципу бессиловых конфигураций. Помимо академического интереса, исследования в этом направлении в очень большой степени стимулировались разработкой магнитных систем термоядерных установок и сильноточных систем индуктивных накопителей. Первоначально концепция бессиловых магнитных конфигураций

с позиций электрофизики плазмы была использована в астрофизике для интерпретации явлений, наблюдавшихся в полярных сияниях, на солнце, в межзвездном пространстве и других астрофизических объектах. В дальнейшем формирование бессиловых магнитных полей было тщательно изучено в лабораторных экспериментах с пинч-эффектами, в которых электрический ток стремится течь параллельно магнитному полю, так что магнитные силы исчезают.

Организация протекания токов по бессиловому принципу может быть также положена в основу разработок электротехнических устройств и термоядерных установок, разгруженных от электродинамических усилий. Важные для приложений вопросы теории бессиловых токовых конфигураций были рассмотрены в работах сотрудников отдела Ю.П.Емца, Ю.М.Васецкого, канд.техн.наук Ю.П.Ковбасенко, А.И.Замирды и канд.физ.-мат.наук А.В.Сорокина. Основное внимание было уделено аналитическим методам исследования бессиловых токовых конфигураций с использованием новейших приемов интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных. В частности, были получены новые результаты при описании бессилового магнитного поля с помощью введения двух скалярных потенциалов, позволивших представить трехмерное магнитное поле полоидальной и тороидальной составляющими.

Новые классы бессиловых магнитных полей, в которых коэффициент пропорциональности между векторами плотности тока и магнитной индукции зависит от компонент магнитного поля, были рассмотрены в ряде работ Ю.П.Емца и Ю.П.Ковбасенко [34,35]. Задача была сведена к интегрированию нелинейного эллиптического уравнения Дюбрейль-Жакотена, возникающего в теории волновых процессов в жидкости с переменной плотностью и геометрической теории поверхностей. Удобным математическим аппаратом для исследования нелинейных уравнений указанного вида послужила теория непрерывных групп преобразований (группы Ли), что позволило провести классификацию бессиловых конфигураций магнитного поля, анализируя допускаемые группы симметрий с операторами сдвига, вращения и растяжения.

Реальные распределения тока всегда ограничены в пространстве. Для бессиловых конфигураций это обстоятельство имеет принципиальное значение, поскольку, как следует из теоремы вириала, ограниченные бессиловые конфигурации возможны только во внешних магнитных полях, систематическое же изучение данного вопроса в литературе отсутствовало. Проведенные анализ постановки и решения краевых задач показал, что для ограниченных областей проблема нахождения бессиловых конфигураций может быть сформулирована двояким образом: для заданной формы границы она сводится к нахождению внешнего магнитного поля и соответствующего ему бессилового распределения во внутренней области; для за-

данного внешнего поля задача формулируется как задача нахождения формы поверхности, ограничивающей область бессилового распределения тока [36]. В этой связи были исследованы следующие системы с бессиловым распределением тока: цилиндрические конфигурации, ограниченные в радиальном направлении, тороидальные системы, бессиловые конфигурации, ограниченные сферической и эллипсоидальной поверхностями.

Влияние переменного коэффициента пропорциональности между векторами плотности тока и индукции наиболее полно было проанализировано Ю.П.Емцем и Ю.П.Ковбасенко для одномерной цилиндрической конфигурации [37,38]. Двумерные цилиндрические конфигурации были рассмотрены Ю.М.Васецким для полей с трансляционной, осевой и винтовой симметриями [36, 39, 40]. Показано, что условия сопряжения потенциального и бессилового полей обуславливают вполне определенный вид магнитного поля внешних источников при заданной геометрии границы. Кроме того, было установлено, что выбором параметра нелинейности можно влиять на соотношение между общим током цилиндрической конфигурации и внешним магнитным полем — продольным для трансляционной симметрии и полем осевого тока для осесимметричных полей. Исследование замкнутой бессиловой конфигурации в виде тороидального соленоида с поверхностным током было проведено Ю.М.Васецким и Ю.П.Ковбасенко [41]. Здесь, в отличие от предыдущих работ, задача была сформулирована как краевая задача со свободной границей. В результате ее решения для выбранного однородного внешнего магнитного поля была найдена форма сечения тора.

В работах сотрудников отдела электрофизики преобразования энергии было показано, что, выбирая различные параметры, характеризующие геометрическое строение электромеханических устройств, можно получить близкие к бессиловым структурам технические системы (соленоиды, электромагниты, токопроводы) с заданным распределением магнитного поля в токонесущих элементах. Этот принцип реализуется, например, в конструкции многовитковой обмотки магнитных систем термоядерных установок торсатронного типа [42].

Изучению бессиловых конфигураций со сферической и эллипсоидальной границами были посвящены работы Ю.П.Емца, канд.техн.наук А.И.Замидры, С.К.Демиденко [43—47]. Были исследованы осесимметричные системы с нелинейной зависимостью между векторами плотности тока и индукции поля, которая в рассмотренных системах связана с наличием тока, охватывающего бессиловую область. Показано, что внешнее магнитное поле, описываемое в виде мультипольного разложения, может быть создано соответствующей системой колышевых токов. Интересные результаты были получены Ю.М.Васецким, Ю.П.Ковбасенко, А.И.Замидрой при исследовании магнитных

поверхностей сферической двухслойной бессиловой конфигурации, находящейся в однородном внешнем магнитном поле. Они позволили изучить равновесные конфигурации плазмы типа компактного тора, одной из реализаций которого могут служить "сферомаки".

Сложные задачи формирования бессиловых магнитных полей в потоках проводящих сред были подробно изучены А.В.Сорокиным [48,49]. В его работах было показано, что при ламинарном течении проводящих сред возможно осуществление бессилового магнитного динамо, если выполняются совместно геометрические и кинематические условия определенного вида. Кинематические соотношения устанавливают в дифференциальной форме связь между векторами индукции магнитного поля и скорости потока среды, а также зависимость векторных полей от плотности и проводимости потока.

Теория бессиловых магнитных полей в пинчах с обращенным полем, развитая в работах Ю.П.Емца, А.И.Замидры и Ю.П.Ковбасенко, позволила правильно объяснить результаты экспериментов на термоядерных установках "Альфа", "Зета" и "НВТХI" по распределению тороидальной и полоидальной составляющих магнитного поля [50]. Было показано, что для точного описания опытных данных по комбинированным пинчам необходимо исходить из бессиловой конфигурации тока для модифицированной цилиндрической модели с переменным коэффициентом пропорциональности между векторами плотности тока и индукции магнитного поля.

Теоретические работы сотрудников отдела электрофизики преобразования энергии проводились в творческом контакте с исследователями физико-технических институтов городов Харькова и Сухуми. Основные результаты исследований опубликованы в центральных академических изданиях. Отдел выступил инициатором и успешно провел в Г.Киеве широкую конференцию по созданию магнитных систем для энергетических и электрофизических установок различного назначения. На этой конференции с обзорными докладами по теории бессиловых токовых конфигураций и разработке на их основе технических систем выступили ведущие сотрудники отдела.

Асимптотические методы в теории электромагнитного поля. Начиная с 1984 года в связи с участием в работах по разработке магнитных систем термоядерных установок, индуктивных накопителей, импульсных сильноточных технологических установок в Институте электродинамики НАН Украины проводились исследования по разработке асимптотических методов в теории электромагнитного поля. Необходимость таких исследований диктовалась высокой сложностью расчета и анализа топологии трехмерных электромагнитных полей исследуемых систем. Вместе с тем рассматриваемые электромагнитные системы

обладают геометрическими особенностями, которые позволяют использовать малые параметры и эффективно применить асимптотические методы. Были развиты подходы к решению задач электродинамики для определенного класса трехмерных электромагнитных полей, которые создаются электропроводными элементами в общем случае пространственной конфигурации с малым, но конечным размером поперечного сечения. Структура электромагнитных полей в этом случае несет в себе особенности как плоских, так и пространственных систем. Применение здесь плоских математических моделей приводит к недопустимым погрешностям, использование же методов решения пространственных задач ведет к неоправданному усложнению расчетов. Развитие теории было направлено на разработку эффективных методов расчета и анализа электромагнитных систем с учетом всех основных геометрических факторов: радиусов кривизны и кручения осевой линии, конфигурации пространственных контуров, распределения источников по площади сечения произвольной формы. Основные результаты были представлены в работах Ю.М.Васецкого, Ю.П.Емца, Ю.П.Ковбасенко.

Теоретические исследования основывались на описании электромагнитного поля в сопутствующей системе координат с криволинейной осью. В сформулированных уравнениях электромагнитного поля и краевых условиях основные слагаемые описываются с использованием операторов плоского поля в поперечном сечении, а дополнительные члены, малые по порядку величины, учитывают изменение полей вдоль криволинейной оси, конечные значения кривизны и кручения [51 – 54]. При дополнительном условии, что поле рассматривается в области вне расположения источников, удается получить мультипольное разложение вблизи криволинейной оси с распределенными вдоль нее моментами плоского поля [55, 56]. В результате была корректно сформулирована приближенная постановка задач, выполнены оценки возникающих погрешностей и определены рациональные пути решения конкретных задач.

Разработка асимптотических методов расчета трехмерных стационарных полей вблизи криволинейной оси позволила с единых теоретических позиций найти выражения для расчета как магнитного и электрического полей, так и их собственной и взаимной энергий, линейной плотности электромагнитных сил [53, 57, 58]. Основное упрощение трехмерной задачи связано с тем, что конфигурация контуров во всех случаях учитывается лишь контурными интегралами, а форма и размер поперечных сечений определяется на основании отдельно рассчитываемых функций плоского поля, параметрически зависящих от положения сечения на контуре. Была показана эффективность созданного программного обеспечения при проведении исследовательских и проектно-конструкторских работ применительно к магнитным системам с мас-

сивными проводниками сложной конфигурации.

Развитый подход был успешно применен для исследования сильноточных магнитных систем, оптимизации их геометрии по уровню возникающих электродинамических сил. Работы выполнялись в сотрудничестве с учеными Харьковского физико-технического института по разработке винтовых магнитных систем термоядерных установок стеллараторного типа с магнитным удержанием плазмы. Были исследованы системы с винтовыми обмотками в цилиндрической и торoidalной геометрии [59, 60, 61]. В частности установлено, что спиральная цилиндрическая система в отсутствие внешних магнитных полей может находиться в состоянии неустойчивого электродинамического равновесия при определенном значении угла навивки проводников. Показано, что в этом случае постоянный угол навивки для цилиндрических и его среднее значение для торoidalных дискретных обмоток увеличивается с ростом размеров сечения проводников, не превосходя величины в 45^0 — известного результата для бессиловой спирали с поверхностным током. Была также показана возможность создания бессилового распределения тока в дискретных винтовых обмотках, находящихся в электродинамическом равновесии, выполнен анализ оптимизированного по плотности тока бессилового распределения в зависимости от поперечных размеров токопроводов и заходности системы.

Для теории и практики существенное значение имеет решение краевых задач в электростатической постановке, а также в случае переменного электромагнитного поля для проводников с сильным скин-эффектом и конечной глубиной проникновения поля. Приближенные способы расчета данного круга трехмерных задач были успешно развиты в рамках применяемого асимптотического подхода [53, 62–66]. Наиболее существенным результатом можно считать доказательство того, что в рассматриваемом приближении общая трехмерная задача сводится к двум известным двумерным: о прямом уединенном цилиндре и о цилиндре, находящемся в однородном внешнем поле, величина которого определяется как полем внешних источников, так и геометрией оси контура. Показано, что развитые асимптотические методы позволяют успешно решать обратные задачи теории поля. Были найдены формы торoidalных поверхностей, для которых обеспечивается равномерное распределение напряженности электрического поля на определенном участке периметра сечения тора, где напряженность наибольшая. Аналогичная задача синтеза решена и для идеально проводящего тора с заданным значением общего торoidalного тока.

Цикл работ, выполненных Ю.М.Васецким, Ю.П.Емцем, канд.техн.наук И.Л.Мазуренко, посвящен развитию асимптотических методов для решения задач о переменном поле пространственных контуров с током с учетом вихревых токов в

проводящей среде. Отправной точкой в этих работах является известная математическая модель об электромагнитном поле малого элемента тока, расположенного над границей раздела сред. Используя представление решения в виде разложения в асимптотический ряд, была успешно решена задача об определении квазистационарного электромагнитного поля, созданного произвольным токовым контуром, который в этом случае по необходимости является замкнутым [67–69]. Существенным упрощением исходной трехмерной задачи является то, что решение удается представить в виде ограниченного ряда, каждый член которого является функцией от поля, созданного током замкнутого контура, для которого возможно использовать хорошо разработанные методы. Полученные аналитические решения позволяют значительно сократить объем вычислений и учсть основные геометрические характеристики систем, частотные характеристики поля, электрофизические свойства электропроводных сред.

Разработанные подходы были успешно использованы при нахождении распределения в пространстве электромагнитного поля разрядных контуров электроимпульсных систем, определения путей уменьшения интенсивности поля [67, 70, 71]. Дальнейшее развитие теории было связано с решением практически важных задач расчета электромагнитного поля, когда контур с переменным током расположен в непосредственной близости от электропроводной поверхности. Проведенные Ю.М.Васецким и И.Л.Мазуренко исследования показали возможность использования асимптотических методов для нахождения плотности потока электромагнитной энергии в проводящую ферромагнитную среду [69, 72, 73]. Эти работы позволили поставить и решить ряд задач в области электротермии по определению геометрии индукторов с пространственной конфигурацией, при которой обеспечивается равномерный нагрев электропроводных лент [74, 75].

Таким образом, на основе асимптотических методов разработаны основные положения теории решения определенного класса трехмерных задач электродинамики для систем с проводниками конечного сечения, образующими пространственные контуры произвольной конфигурации.

Применение численных методов для анализа электромагнитных процессов в проводящих средах. Методы вычислительной электродинамики в последнее время становятся одним из основных инструментов для исследования сложных процессов и явлений, лежащих в основе создания нового электротехнического оборудования с улучшенными характеристиками. Использование этих методов совместно с компьютерным моделированием позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными затратами (из-за сокращения объема необходимых экспериментальных исследований) получать новую информацию и находить оптималь-

ные конструктивные решения и режимы работы разрабатываемых устройств.

Начиная с 1980 г. в отделе импульсных электромеханических преобразователей энергии под руководством И.М.Постникова и В.Т.Чемериса численные методы широко использовались для анализа широкого класса задач (см. таблицу) и в частности для исследования взаимодействия движущихся проводящих сред с сильным импульсным магнитным полем [76–84]. Было показано, что оптимальным для данного класса задач (открытые области, отсутствие ферромагнитных элементов) являются методы интегральных уравнений — объемных или граничных. На основе этих методов были разработаны пакеты программ (см., например, [81]) и исследованы условия оптимального преобразования импульсной электрической энергии в механическую в ускорителях индукционного и рельсового типа. Результаты исследований использованы при разработке электроимпульсных противообледенительных систем (Московский авиационный завод "Дзержинец") и метательных систем (НИИ Электрофизической аппаратуры, г. Санкт-Петербург). Также, по результатам исследований, выполненных Г.Г.Капустяненко, А.И.Сююкиным и С.С.Пигнастием, были разработаны новые типы генераторов электрической энергии с жидкокометаллическим якорем.

Практическая потребность в решении задач, связанных с анализом процессов в электротехнологических установках, особенностью которых является наличие закрытых областей и нелинейных и композиционных сред, обусловила необходимость разработки комплекса программ на основе метода контрольного объема. Разработанные программы использовались для анализа электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в таких установках [85–88]. По инициативе А.Ф.Колесниченко и при участии Б.А.Ющенко был исследован новый способ импульсной обработки расплавленного металла в процессе его кристаллизации.

Результаты экспериментальных исследований показали значительное улучшение структуры такого металла. По результатам исследования электромагнитных и гидродинамических процессов в установке магнитодинамического типа (совместно с ФИИМС НАН Украины) была разработана система управления движением жидкого металла, обеспечивающая высокую точность его дозирования при разливке в формы.

Метод контрольного объема в силу своей простоты в реализации использовался для анализа электромагнитных процессов в проводящих и диэлектрических средах со сложной структурой. Был разработан комплекс программ для численного анализа электрического поля в композиционных диэлектриках [89–93] и изучено влияние структуры диэлектрика и частоты внешнего поля на эффективные характеристики диэлектрической среды. Примером электропроводящей среды, харак-

Применяемые методы численного моделирования электромагнитных процессов

Применяемые методы и подходы	Класс решаемых задач	Общая характеристика метода	
		Достоинства	Недостатки
1. Метод интегральных уравнений	1. Расчет импульсного магнитного поля в проводящих средах [76–82]. 2. Индукционные и рельсовые ускорители массивных проводников [83,84].	Проявляются при расчете в открытой области. Расчетной сеткой покрывается только область проводников.	Полностью заполненная матрица системы уравнений. Плохая обусловленность системы. Сложно учесть нелинейность характеристик.
2. Метод контурного объема	1. Магнитогидродинамическое перемешивание расплавленного металла [85–88]. 2. Электрическое поле в гетерогенной структуре полиэтиленовой изоляции [89–93]. 3. Электрическое поле в биологических системах [94,95].	Простота реализации. Разреженная матрица. Экономно расходование компьютерных ресурсов.	Приближенный учет геометрии. Невысокая точность расчета.
3. Метод конечных элементов	1. Расчет электрического поля в гетерогенной изоляционной структуре кабеля при наличии дефектов [96]. 2. Расчет электромагнитных и тепловых процессов в кабельной линии [97]. 3. Расчет эквивалентных параметров кабельной линии при различной частоте [98]. 4. Волновые процессы в кабельной линии [99].	Учет сложной геометрии расчетной области и границ раздела фаз. Учет нелинейности характеристик материала. Высокая точность расчетов	Необходим компьютер с большой оперативной памятью и высоким быстродействием
4. Метод (подход) многомасштабного моделирования	Индукционный нагрев [100]. Электрическое поле и эквивалентные параметры композиционной структуры полиэтиленовой изоляции с дефектами [91].	Анализ процессов на различных масштабных уровнях.	Сложность расчетов. Необходимость мощного компьютера.

теризующейся сложной структурой, является биологическая среда. Моделирование электромагнитных процессов в таких средах является актуальной задачей с точки зрения изучения механизмов, вызывающих вредное влияние электромагнитного поля, например, поле мобильного телефона, а также полезное терапевтическое воздействие в медицинской практике. В работе исследовались процессы при воздействии внешнего электромагнитного поля на двух пространственных уровнях — в теле человека [94] и в объеме биологической клетки [95]. Изучены экранирующие свойства мембранных клетки при различной частоте внешнего поля.

При расчетах по методу конечного объема используется, как правило, прямоугольная сетка. Это обуславливает простоту его реализации на компьютерах средней производительности, однако снижает точность расчетов при расчете поля в областях со сложной геометрией. Для повышения точности были разработаны новые физико-математические модели и выполнен численный анализ методом конечных элементов электрического поля в высоковольтных кабелях с полиэтиленовой изоляцией [96–100]. Разработанные на их основе методики внедрены на заводе "Южкабель", г. Харьков и использованы при проектировании и разработке технологии изготовления силового кабеля на на-

пряженение 110 кВ.

Разработка теории и методов расчета индукционных систем для термообработки плоского проката металлов. При холодной прокатке металлов повышается его прочность и резко снижается пластичность. Пластические свойства, необходимые для операции прокатки, восстанавливают промежуточными операциями отжига. Для этой цели обычно применяются печи сопротивлений, в которых тепло передается излучением, конвекцией или теплопроводностью. Они не обеспечивают равномерный нагрев металла по всему объему, обладают большой инертностью и низким КПД (15–59%). Это настоятельно требует замены установок косвенного нагрева высокопроизводительными, экономическими установками индукционного нагрева, в которых преобразование электрической энергии в тепловую происходит непосредственно в нагреваемом металле, что позволяет интенсифицировать процессы передачи энергии в 10^4 раз выше, чем в существующих методах косвенного нагрева. Существующие индукционные установки, как правило, однофазного исполнения, питались от преобразователей частоты. Но с ростом мощности они приводили к возникновению значительного акустического (производственного)

шума, и при потоке мощности уже $200 \text{ кВт}/\text{м}^2$ производственный шум превысил 120 дБ, что существенно ограничивает мощность и производительность индукционных печей протяжного отжига.

Для устранения указанных недостатков в 1981 г. Институтом электродинамики НАН Украины было предложено применить для термообработки плоского проката металлов бегущее магнитное поле. В мировой практике электротехнология индукционного нагрева плоского проката на промышленной частоте бегущим магнитным полем осуществлена впервые (авторское свидетельство № 1653184 с приоритетом от 10.04.1986 г., заявитель — Институт электродинамики АН УССР). Такую индукционную установку предложено выполнять в виде двухсторонней плоской линейной машины с трехфазной обмоткой, в воздушном зазоре которой движется нагреваемая лента. Нагрев осуществляется вихревыми токами, индуцированными в ленте бегущим магнитным полем. Первая опытная установка такого типа прошла промышленные испытания в 1982 г. на отжиге трубной заготовки из латуни Л-68 в линии травления фирмы "Шкода" на Кировском заводе ОЦМ. Благодаря полученной однородности механических свойств и мелкозернистой структуре металла на трубосварочном стане получены трубы высокого качества [101].

В 1984 году Институт электродинамики АН УССР совместно с Кировским заводом ОЦМ разработали и пустили в эксплуатацию технологическую линию отжига — травления для термообработки лент из меди и ее сплавов толщиной 0,18—1,0 мм с индуктором мощностью 1 МВА [102].

В 1987 году на основе созданных Институтом электродинамики АН УССР индукторов начала действовать линия индукционного отжига лент толщиной 1,0—2,8 мм в цехе прецизионного проката [103].

В 1989 — 1992 г.г. подобные индукционные установки были созданы в ПО "Южцветметобработка" (г. Орск), ПО "Балхашмедь" (г. Балхаш) и однофазные установки повышенной частоты на металлургическом заводе в г. Нытва и заводе "Кристалл" (г. Владикавказ) для термообработки биметаллических лент и др.

Основные работы по проектированию промышленных образцов индукторов выполнены Погребновым М.А., а по отработке технологических режимов — Крутилиным В.А.

Создание установок индукционного нагрева листового проката различных металлов и типоразмеров потребовало разработки принципов построения и оптимизации электродинамических систем, формулировки четких рекомендаций по проектированию и выбору рабочих режимов.

В разработке основ теории, методов расчета, принципов исполнения и оптимизации, а также в экспериментальных исследованиях и доводке оборудования принимали участие Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Ковбасенко Ю.П., Кондратенко

И.П., Ращепкин А.П.

Для разработки методов расчета, оптимизации процессов нагрева, определения локального распределения джоулевых тепловыделений и температуры, а также основных энергетических показателей и конструктивных соотношений существующие модельные представления анализа электромагнитных процессов в линейных индукционных машинах оказались непригодными. Поэтому были сформулированы и обоснованы новые модельные представления, более полно отражающие физические процессы в машине и учитывающие конструктивные особенности исполнения индукторов [104,105]. Неравномерное распределение индуцированных в полосе токов, обусловленное влиянием поперечного краевого эффекта, затрудняет обеспечение требуемой равномерности джоулевого тепловыделения и температуры по ширине ленты. Полученные результаты представлены в виде бесконечных, медленно сходящихся рядов, что снижает точность расчета и ограничивает полноту анализа. Разработанный на основе краевой задачи Римана—Гильберта метод анализа электромагнитных процессов в линейных индукторах позволил описать структуру электромагнитных полей простыми функциональными зависимостями и с высокой точностью определить влияние величины вылета ленты за пределы магнитопровода в зависимости от величины потоков с боковых граней и спинок индукторов. Найдено распределение индуцированных токов и джоулевых тепловыделений в металле и оценены допустимые технологические смещения нагреваемой ленты в зазоре индуктора [106,107]. Методами теории функций комплексного переменного разработаны методы расчета электромагнитных полей, вихревых токов и джоулевых тепловыделений в нагреваемой металлической полосе в линейных индукционных машинах с пространственной асимметрией ее положения в индукторе [108]. Установлено, что пространственная асимметрия положения нагреваемой ленты деформирует картину индуцированных полей и токов, вызывая их концентрацию и локальный нагрев металла в зоне с меньшим вылетом, приводит к появлению дестабилизирующей, направленной в сторону большего вылета, поперечной силы.

Для ослабления влияния поперечного краевого эффекта на основе решения обратной краевой задачи проанализированы пути повышения равномерности распределения джоулевых тепловыделений в движущейся металлической полосе с помощью профилирования высоты зазора между индукторами [109, 110]. В зависимости от электрофизических свойств металлической полосы определен закон профилирования зазора, при котором обеспечивается равномерный нагрев полосы лишь для фиксированных типоразмеров лент, что ограничивает возможность их технического использования. Для анализа электромагнитных и тепловых процессов индукционного нагрева лент

на основе совместного решения уравнений электродинамики и нестационарного уравнения теплопроводности исследованы возможности повышения равномерности распределения температуры по ширине ленты путем выполнения индуктора с изменяющимися по длине шириной сердечника и скоростью бегущей волны магнитного поля с учетом возбуждения в зазоре бегущего, пульсирующего и обратно бегущего магнитного поля и экспоненциальным затуханием его за пределами сердечников [111]. Показана возможность незначительного повышения таким способом равномерности нагрева движущейся металлической полосы. Вследствие значительного усложнения конструкции индуктора и появления заметной асимметрии фазных токов, приводящей к возбуждению пульсирующих и обратно бегущих полей, такое исполнение индуктора представляется малооправданным.

В процессе нагрева ленты ее температура в пределах индуктора изменяется от 20^0 С на входе до 700^0 С на выходе, а вследствие влияния поперечно-го краевого эффекта наблюдается возрастание температуры металла в зоне боковых кромок ленты, что приводит к неоднородности электропроводности и сказывается на локальном распределении джоулевых тепловыделений и температурных полей. Выполненный в работах [112, 113] детальный анализ электромагнитных и тепловых процессов показал, что температурная зависимость электропроводности незначительно усиливает неоднородность распределения температуры по ширине ленты, а совместное влияние температурной зависимости электропроводности по длине и продольного краевого эффекта усугубляет асимметрию фазных токов и возрастание пульсирующих полей. Но для определения энергетических показателей индукторов с достаточной точностью можно использовать среднеинтегральное значение электропроводности в пределах индуктора. Пульсирующие поля приводят к возникновению контуров тока, охватывающих активную зону индуктора, приводя к перегреву боковых кромок [114].

С привлечением новых модельных представлений [115] и математических методов группового анализа нелинейных уравнений [116], сформулированных на основе подхода Л.Р.Неймана, исследованы электрофизические процессы взаимодействия бегущего магнитного поля с ферромагнитными средами. Найденные аналитические зависимости позволили получить новую информацию о физических явлениях и дать более точное количественное и качественное описание процессов в нагреваемом ферромагнетике.

Поскольку линейная асинхронная машина относится к классу несимметричных машин с магнитной асимметрией, то для обеспечения симметрии ее фазных электрических параметров предложено использовать несимметричную трехфазную обмотку. На основе решения обратной краевой

задачи [117] найдены условия и установлены способы симметрирования электрических параметров фазных обмоток линейной асинхронной машины для любого фиксированного режима работы. Показано, что в зависимости от конструктивного исполнения симметрируемой обмотки [118] равенство электрических параметров может быть достигнуто лишь изменением размеров, пространственного сдвига и количества витков катушек каждой фазы.

Исследование электромагнитных и температурных полей в индукторах бегущего магнитного поля с магнитопроводами конечной длины и учетом локального распределения токов обмотки потребовало привлечения теории обобщенных функций в связи с разрывными коэффициентами дифференциальных уравнений, описывающих поля [119, 120]. Разработана методика расчета трехмерного электромагнитного поля и распределения температуры для произвольного пространственного распределения обмоток, комплексно учитывающая влияние продольного, поперечного и толщинного эффектов. Предложены способы управления распределением джоулевых тепловыделений в полосе путем изменения структуры электромагнитных полей с использованием асимметрии питающего напряжения, индукторов с изменяемым пространственным положением фаз [121], двухобмоточных индукторов с различным полюсным делением каждой из обмоток [122].

Анализ электродинамических процессов в индукторах с ферромагнитными сердечниками показал, что при нагреве ферромагнитных лент возникает дестабилизация положения ленты в зазоре [122, 123]. Поэтому техническая реализация нагрева ферромагнитных лент в индукторах бегущего поля на промышленной частоте не представляется возможной. В связи с этим выполнен поиск конфигураций бессердечниковых индукторов, при которых обеспечивается равномерный нагрев лент. Установлено, что токовыми контурами канонической формы (прямоугольник, ромб, круг, эллипс), компланарными поверхности нагреваемой ленты, не обеспечивается равномерный нагрев лент конечной ширины [124]. Однако в индукционных системах с пространственно распределенной конфигурацией и комбинацией токовых контуров эллиптической формы [125] достигается удовлетворительная равномерность нагрева движущихся лент по ширине при обеспечении динамической стабилизации ленты в индукторе.

Исследование электрических разрядов. В 70-е годы в СССР и США были начаты активные работы по созданию МГД-генератора, теоретически позволявшего повысить КПД преобразователей тепловой энергии в электрическую с 42 до 60 %. Одной из основных проблем, возникших при разработке МГД-генератора, было создание высокотемпературной электрической изоляции генератора. Решение этой задачи было поручено Институту электродинамики (ИЭД) АН УССР. В связи с этим в

отделе № 7 (отдел электрофизики преобразования энергии) были проведены исследования электрической прочности газообразных и твердых диэлектриков при высоких температурах. В результате этих исследований были получены принципиально новые результаты. Так, было установлено, что закон Пащеня, по которому определяется электрическая прочность газа при температурах порядка комнатной, можно модифицировать и использовать вплоть до 3000 К. Особенность пробоя нагретых твердых диэлектриков состоит в том, что при высоких температурах (~ 1000 К для оксидов магния и алюминия) их объемная электрическая прочность становится ниже поверхностной. В дальнейшем накопленный опыт исследований электрических разрядов в нагретых диэлектриках позволил разработать новые электроразрядные методы измерения температуры поверхности электропроводных тел, в частности прокатываемых лент и стержней. Созданные на основе этих методов измерители высоких температур были внедрены на четырех крупных металлургических заводах (в городах Кирове, Балхаше, Красноярске и Иркутске). Идеи измерения температуры нагретой электропроводящей поверхности отражены в триадцати авторских свидетельствах.

В конце 90-х годов основным направлением научных исследований по газоразрядной тематике стало изучение способов создания и свойств объемного разряда при атмосферном давлении газа. Повышенный интерес к объемным разрядам атмосферного давления обусловлен его преимуществами по сравнению с другими видами разрядов. Они заключаются в том, что в условиях повышенного давления газа и сильного электрического поля разряд равномерно заполняет межэлектродный промежуток. Эти свойства обеспечивают разряду большую производительность и высокую эффективность "полезных" плазмохимических реакций в газе. "Классический" способ генерации объемного разряда в межэлектродном промежутке состоит в приложении к нему импульсных перенапряжений, которому предшествует предварительная ионизация газа. Этот способ, как правило, используется в электрофизических установках и не нашел широкого практического применения.

К объемному разряду атмосферного давления можно отнести барьерный разряд, который в виде отдельных стримерных каналов равномерно заполняет все межэлектродное пространство. Применение барьерного разряда связано с вынужденной необходимостью использования диэлектрических барьера на электродах. Наличие этих барьера во многом определяет (снижает) надежность и ресурс работы устройств.

Альтернативой барьерному разряду может служить положительный стримерный коронный разряд, который обеспечивает высокие напряженности электрического поля в головках стримеров. Однако, при осуществлении такого разряда в про-

межутке с традиционной геометрией типа "игла—плоскость" нельзя достичь пересечения стримерами всего межэлектродного расстояния без затухания. Это представляет собой значительный недостаток, так как существенно (на 20...30 % по сравнению с барьерным разрядом) снижает эффективность использования энергии, вложенной в разряд. Для устранения этого недостатка была выдвинута идея новой геометрии разрядного промежутка, в котором коронирующие иглы расположены на плоском дисковом аноде. Такая геометрия позволяет получить повышение среднего электрического поля в промежутке, за счет которого стримеры, зарождающиеся вблизи концов игл, пересекают все межэлектродное пространство без затухания. Для реализации этой идеи требовалось провести расчеты и эксперименты, определяющие оптимальные геометрические параметры такой электродной системы.

Чтобы установить характерные геометрические параметры анода, проводились численные расчеты электростатического поля в межэлектродном промежутке. Вначале была определена оптимальная высота h цилиндрической коронирующей иглы. Следующим этапом исследований было определение расстояния между иглами a . При оптимальных значениях h и a разряд заполнял весь межэлектродный промежуток и обеспечивал удельные затраты энергии на генерацию озона на уровне 14 кВт·ч на 1 кг озона, что не уступает показателям по барьерному разряду.

После определения выгодных геометрических параметров электродной системы дальнейшие усилия были направлены на оптимизацию условий разряда. При этом изучалась роль влажности воздуха и его движения в разрядном промежутке. Изучение влияния паров воды на разряд подтвердило в целом известные для барьерного разряда результаты, что при переходе от сухого воздуха к влажному удельные затраты энергии возрастают почти в два раза. Однако эти исследования показали также, что наличие в газовой среде озона с большой концентрацией (2 мг/л) влияет на параметры разряда (максимальный ток короны, напряжение горения, удельные затраты энергии и т. д.) намного сильнее, чем пары воды с такой же концентрацией.

Фактором, улучшающим энергетические характеристики стримерной короны, может служить движение газа. Продувка воздуха поперек разряда со скоростью более 10 м/с увеличивает почти вдвое максимальный ток разряда и уменьшает на треть удельные затраты энергии на получение озона. Вместе с тем такая продувка требует слишком больших расходов газа, что в ряде случаев может быть неприемлемым по технологическим условиям. Исследования показали, что этого недостатка можно избежать, если осуществлять подачу воздуха вдоль оси коронирующих игл через сопла малого диаметра, обеспечивающих турбулизацию

газового потока, поступающего в зону разряда. Благодаря такой осевой продувке эффект положительного влияния движения газа на разряд может быть достигнут при расходах воздуха вдвадцать раз меньших, чем при поперечной продувке.

На основе выполненных исследований был разработан образец типового генератора озона, обеспечивающий при использовании осущененного воздуха производительность по озону 2 г/ч с удельными затратами энергии 14 кВт·ч/кг. Такие генераторы успешно прошли длительные испытания (более 2000 ч) в установках озонирования питьевой воды и очистки воды в плавательных бассейнах. Эти испытания также показали, что разработанный генератор может служить типовым модулем при создании многомодульной установки с большой производительностью по озону (100 г/ч).

Положительные свойства стримерной короны в предложенной электродной системе с многоигольчатым анодом (объемный характер разряда, наличие катодного слоя, небольшие удельные затраты энергии на получение озона) обусловили начало исследований такого разряда, в котором роль катода играет электропроводная жидкость. При этом ставились задачи определения особенностей коронного разряда на поверхность электропроводной жидкости, путей повышения стабильности разряда и конструктивных решений системы "электрод—поверхность жидкости".

Практическая направленность этих исследований состоит в разработке упрощенной и с малыми затратами энергии электроразрядной технологии обработки воды. Как известно, одна из таких технологий — генерация озона в барьерном или коронном разрядах, посредством которого обрабатывается предварительно очищенная вода. При этом возникает необходимость в растворении озона в воде, что достигается применением барботажных устройств. Однако эти устройства не обеспечивают полного использования наработанного озона и существенно усложняют и удороажают технологическую линию. От барботирования можно отказаться, если использовать непосредственную обработку воды коронным разрядом, при которой одним из электродов была бы сама обрабатываемая вода. Попытки использования такого способа обработки воды предпринимались. Однако при этом использовали коронный разряд с обычной геометрией разрядного промежутка типа "игла—плоскость". Выяснилось, что при использовании такой геометрии удельные затраты энергии на обработку питьевой воды составляют весьма значительную величину, а именно 1 кВт·ч/м³. Поэтому тематика исследований отдела № 7 в области газоразрядных технологий была дополнена также изучением возможностей стримерной короны по непосредственной очистке сю воды.

Для изучения влияния удельной электропроводности жидкости σ на разряд в опытах был использован ряд жидкостей со значениями σ от

$2 \cdot 10^{-6}$ См/см (дистиллированная вода) до $6,7 \cdot 10^{-2}$ См/см (5% раствор NaCl). Исследования показали, что электрические характеристики и внешний вид положительной стримерной короны на поверхность жидкости подобны тем, которые присущи разряду, протекающему в электродной системе с металлическим катодом.

Химическая эффективность разряда определялась по количеству озона, растворенного в воде. Анализ результатов исследования показал, что основным процессом, влияющим на появление растворенного в воде озона, служит не абсорбция озона жидкостью из газовой фазы, а плазмохимические реакции, протекающие при разряде вблизи ее поверхности. Удельные затраты энергии на получение концентрации растворенного озона $W_p = 1 \text{ г}/\text{м}^3$ в условиях проводившихся экспериментов составили около 0,11 кВт·ч/м³. Этот параметр не хуже, чем в случае обработки питьевой воды озоном, полученным в барьерном разряде на осушенному воздухе. Однако, учитывая, что при обработке воды стримерной короной отсутствует необходимость в осушителях воздуха и барботерах для растворения озона, можно утверждать, что по экономичности и удельным затратам энергии предложенный метод конкурентоспособен по отношению к традиционному озонированию воды посредством барьерного разряда.

Для электроразрядной очистки сильнозагрязненной воды, содержащей фенолы, органические примеси и другие загрязнители, требуются большие удельные затраты энергии, достигающие сотен кВт·ч/м³. С целью выяснения того, насколько возможно снизить уровень удельных затрат энергии для рассматриваемого случая, было начато изучение подводного импульсного, так называемого, диафрагменного разряда. Исследования показали, что по степени разложения вредных примесей, содержащихся в воде, и удельным затратам энергии на ее обработку такой разряд может быть эффективнее используемого сейчас на практике подводного импульсного коронного разряда.

По электроразрядной тематике в отделе электрофизики преобразования энергии защищены три кандидатские диссертации, опубликовано свыше ста научных работ и получено более двадцати авторских свидетельств и патентов.

1. Емец Ю.П. Электрические характеристики композиционных материалов с регулярной структурой. — К.: Наукдумка, 1986. — 191 с.

2. Емец Ю.П., Резцов В.Ф. Об эффективных электрических характеристиках проводящей среды с анизотропными вследствие эффекта Холла сферическими неоднородностями // ПМТФ. — 1976. — № 1. — С. 138—141.

3. Емец Ю.П., Резцов В.Ф. О полях в сплошных проводящих средах с неоднородными включениями при наличии эффекта Холла // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1976. — № 11. — С. 1016—1018.

4. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П. К вопросу об эффективных параметрах случайно-неоднородных проводящих сред в магнитном поле // ЖТФ. — 1979. — Т. 49. — № 3. — С. 488—493.
5. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П. Свойства электрических полей в неоднородных проводящих средах, находящихся в сильном внешнем магнитном поле // ПМТФ. — 1979. — № 5. — С. 37—44.
6. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П. К теории расчета обобщенных характеристик случайно-неоднородных проводящих сред // Техн. электродинамика. — 1980. — № 1. — С. 9—16.
7. Емец Ю.П. Об аномальной проводимости плазмы в одной точно разрешимой электродинамической модели // ТВТ. — 1972. — Т. 10. — № 3. — С. 640—641.
8. Емец Ю.П. Периодическая структура электрического поля в стратифицированной плазме с тензорной проводимостью // ПММ. — 1972. — № 4. — С. 617—625.
9. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Жукова Н.И., Зверович Э.И. Электрические поля в слоисто-неоднородных средах с гальваническими явлениями // ЖТФ. — 1979. — Т. 49. — № 8. — С. 1577—1584.
10. Городжса Л.В., Емец Ю.П. О характеристиках сильно неоднородных сред в магнитных полях // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1982. — № 3. — С. 51—54.
11. Городжса Л.В., Емец Ю.П. Предельная проводимость двумерных систем в магнитном поле // ЖТФ. — 1982. — Т. 52. — № 8. — С. 1514—1520.
12. Городжса Л.В., Емец Ю.П. Двумерные неоднородные системы в сильных магнитных полях // ЖТФ. — 1982. — Т. 52. — № 9. — С. 1705—1711.
13. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Зверович Э.И. Задача об электрическом поле одной гетерогенной системы // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1981. — № 6. — С. 90—93.
14. Emets Y.P., Gorodga L.V., Reztsov V.F., Vasetsky Y.M. Electrical Fields and Transport Properties of Nonuniform Plasmas in High Magnetic Fields // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 1979. — № 11. — Р. 383—386.
15. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Емец Ю.П. Об электрических полях и проводимости систем с регулярной структурой неоднородностей // ЖТФ. — 1982. — Т. 52. — № 4. — С. 601—606.
16. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Емец Ю.П. Параметры неоднородных полупроводников для магниторезисторов // Техн. электродинамика. — 1984. — № 1. — С. 9—15.
17. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Жукова Н.И., Зверович Э.И. О применении обобщенной краевой задачи Римана к расчету электрических полей // Доклады АН БССР. — 1979. — Т. 23. — № 2. — С. 118—120.
18. Емец Ю.П., Обносов Ю.В. Точное решение задачи о формировании тока в двоякопериодической гетерогенной системе // Доклады АН УССР. — 1989. — Т. 309. — № 2. — С. 319—322.
19. Емец Ю.П., Обносов Ю.В. Точно разрешимая задача о взаимном влиянии включений в теории гетерогенных сред // ПМТФ. — 1990. — № 1. — С. 21—29.
20. Емец Ю.П., Обносов Ю.В., Онофрийчук Ю.П. Электрические силы в диэлектрическом двухслойном цилиндре с неконцентрическим расположением слоев // ПМТФ. — 1996. — Т. 37. — № 1. — С. 3—14.
21. Городжса Л.В., Емец Ю.П. Краевые задачи электродинамики для ограниченных областей с источниками // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1985. — № 11. — С. 77—80.
22. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Стрилько С.И. Электрические поля и характеристики двухэлектродных полупроводниковых систем с эллиптическими отверстиями // ЖТФ. — 1986. — Т. 56. — № 2. — С. 346—352.
23. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Стрилько С.И. Электрические поля полупроводниковых колец с эффектом Холла. I // ЖТФ. — 1987. — Т. 57. — № 7. — С. 1233—1241.
24. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Стрилько С.И. Электрические поля полупроводниковых колец с эффектом Холла. II // ЖТФ. — 1987. — Т. 57. — № 7. — С. 1242—1245.
25. Городжса Л.В., Емец Ю.П., Стрилько С.И. Краевые задачи электродинамики для двухсвязных областей // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1987. — № 9. — С. 77—80.
26. Емец Ю.П. Электрическое поле проводящей среды с двоякопериодическими неоднородностями в магнитном поле // Доклады АН УССР. Сер. "А". — 1980. — № 11. — С. 82—85.
27. Емец Ю.П. Преобразования симметрии двухмерной двухкомпонентной электропроводной системы // ЖЭТФ. — 1989. — Т. 96. — № 2. — С. 701—711.
28. Емец Ю.П., Обносов Ю.В. Компактный аналог гетерогенной системы со структурой шахматного поля // ЖТФ. — 1990. — Т. 60. — № 8. — С. 59—66.
29. Емец Ю.П. О проводимости среды с неоднородными включениями в магнитном поле // ЖТФ. — 1974. — Т. 44. — № 5. — С. 916—921.
30. Емец Ю.П. Краевые задачи электродинамики анизотропно проводящих сред. — К.: Наукдумка. 1987. — 255 с.
31. Емец Ю.П. Электрические характеристики трехкомпонентной диэлектрической среды // ЖЭТФ. — 1998. — Т. 114. — № 3. — С. 1121—1136.
32. Емец Ю.П. Электрические характеристики трехкомпонентных диэлектрических композитов с плотной упаковкой включений // ПМТФ. — 2001. — Т. 42. — № 4. — С. 165—176.
33. Емец Ю.П. Преобразования симметрии и соотношения взаимности в теории многокомпонентных диэлектрических сред // ЖЭТФ. — 2000. — Т. 118. — № 5. — С. 1207—1221.
34. Емец Ю.П., Ковбасенко Ю.П. Некоторые свойства симметрии уравнений бессиловых магнитных полей // Доклады АН УССР. — Сер. А. — 1983. — № 12. — С. 58—61.
35. Емец Ю.П., Ковбасенко Ю.П. Групповые свойства и инвариантные решения уравнений бессиловых магнитных полей. // Доклады АН УССР. — Сер. А. — 1982. — № 6. — С. 69—73.
36. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П., Ковбасенко Ю.П. О бессиловом распределении тока в ограниченных областях. // Доклады АН УССР. — Сер. А. — 1983. — № 10. — С. 67—70.
37. Емец Ю.П., Ковбасенко Ю.П. К вопросу о построении бессиловых магнитных конфигураций // ЖТФ. — 1983. — Т. 53. — Вып. 8. — С. 1425—1429.
38. Ковбасенко Ю.П. Бессиловое распределение тока с осевой симметрией. // Техн. электродинамика. — 1983. — № 2. — С. 9—16.
39. Васецкий Ю.М. Бессиловые цилиндрические конфигурации токов в гофрированных внешних магнитных полях. // Техн. электродинамика. — 1985. — № 24. — С. 9—14.
40. Васецкий Ю.М. Особенности бессиловых конфигураций токов в винтовых внешних магнитных полях // Техн. электродинамика. — 1986. — № 2. — С. 16—21.
41. Васецкий Ю.М., Ковбасенко Ю.П. Тороидальные ка-

- тушки магнитного поля с бессиловым распределением тока // Известия ВУЗов. Электромеханика. — 1988. — № 4. — С. 60 — 64.
42. А.С. СССР № 1153709. МКИ G21B1/00. Бессиловая винтовая многовитковая обмотка торсатрона. / Васецкий Ю.М., Георгиевский А.В., Емец Ю.П. и др. // БИ. — 1985. — № 44.
43. Емец Ю.П., Замидра А.И. Бессиловое магнитное поле в шаровой области с осевым током // ЖГФ. — 1985. — Т. 55. — Вып. 3. — С. 475 — 478.
44. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П., Замидра А.И. Бессиловая магнитная система со сферической границей // Доклады АН УССР. — Сер. А. — 1984. — № 12. — С. 58 — 70.
45. Демиденко С.К., Замидра А.И. Бессиловые распределения тока, ограниченные сферическими поверхностями // Техн. электродинамика. — 1985. — № 5. — С. 27 — 31.
46. Емец Ю.П., Замидра А.И. Эллипсоид с бессиловыми вихрями тока // Техн. электродинамика. — 1985. — № 6. — С. 3 — 7.
47. Замидра А.И., Демиденко С.К., Ромашев Л.Н. Теоретическое и экспериментальное изучение магнитных систем с бессиловой обмоткой. // Техн. электродинамика. — 1993. — № 1. — С. 12 — 17.
48. Емец Ю.П., Сорокин А.В. Принцип построения магнитных систем на основе бессиловых конфигураций // Электричество. — 1988. — № 9. — С. 11 — 15.
49. Емец Ю.П., Сорокин А.В. Бессиловое магнитное поле в потоках проводящих сред // Доклады АН УССР. — Сер. А. — 1987. — № 6. — С. 45 — 49.
50. Емец Ю.П., Замидра А.И., Ковбасенко Ю.П. О бессиловых конфигурациях в пинчах с обращенным полем // Физика плазмы. — 1988. — Т. 14. — Вып. 3. — С. 306 — 312.
51. Васецкий Ю.М. Описание электромагнитного поля в системе координат с криволинейной осью // Техн. электродинамика. — 1988. — № 6. — С. 27 — 33.
52. Васецкий Ю.М., Ковбасенко Ю.П. Численно-аналитический метод расчета магнитных систем с токопроводами произвольной конфигурации // Электричество. — 1989. — № 12. — С. 72 — 74.
53. Васецкий Ю.М. Описание электромагнитного поля в системах с криволинейной пространственной осью // Электричество. — 1990. — № 10. — С. 55 — 59.
54. Vasetsky Y.M. Asymptotic Method for Calculation of Electromagnetic Fields and Forces in Systems with Spatial Conductor Configurations // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. — March 2000. — Vol. 10. — N 1. — P. 1384 — 1387.
55. Васецкий Ю.М. Мультипольное представление электрического и магнитного полей в системах с криволинейными проводниками // Электричество. — 1999. — № 11. — С. 49 — 53.
56. Vasetsky Y.M. The Multipole Expansion of Three-Dimensional Electro-Electromagnetic Fields for Systems with Curved Conductors // Proc. of 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering. Montreal. 25-29 August, 1997. — № 3498.
57. Васецкий Ю.М. Приближенный метод расчета магнитного поля внутри и в окрестности проводника плоского контура // Техническая электродинамика. — 1987. — № 4. — С. 3 — 7.
58. Васецкий Ю.М., Ковбасенко Ю.П. К расчету магнитного поля пространственных контуров с током // Известия ВУЗов, Электромеханика. — 1987. — № 5. — С. 8 — 32.
59. Васецкий Ю.М. Электродинамические силы, действующие на спиральные проводники с током // Электричество 1987. — № 2. — С. 39 — 42.
60. Васецкий Ю.М. Моделирование электродинамических сил в пространственных контурах с током // Электронное моделирование. — 1987. — Т.9. — №2. — С. 36 — 40.
61. Бида В.В., Васецкий Ю.М., Захарченко С.В. К расчету токоведущих систем, образованных контурами сложной геометрии // Известия ВУЗов, Электромеханика. — 1990. — № 6. — С. 19 — 27.
62. Васецкий Ю.М. Электромагнитный расчет идеально проводящих плоских контуров с током // Техн. электродинамика. — 1989. — № 2. — С. 8 — 14.
63. Васецкий Ю.М. Поверхностный эффект в массивном проводнике, образующем плоский контур // Техн. электродинамика. — 1989. — № 5. — С. 18 — 25.
64. Vasetzky Y.M Electric field calculation method in systems with curved axis // 7th International Symposium on High Voltage Engineering. Dresden, 26—30 August, 1991. — Vol. 1. — Electromagnetic field. — P. 11 — 14.
65. Васецкий Ю.М. Асимптотический метод расчета плотности тока в пространственных криволинейных проводниках с сильным поверхностным эффектом // Техн. электродинамика. — 1998. — Спец. вып. 2. — Т. 1. — С. 259 — 260.
66. Васецкий Ю.М. Приближенный расчет магнитного поля массивных спиральных проводников с сильным поверхностным эффектом // Техн. электродинамика. — 1998. — Спец. вып. 2. — Т. 1. — С. 261 — 262.
67. Васецкий Ю.М. Электромагнитное поле импульсного тока, протекающего над проводящим полупространством // Препринт ИЭД АН Украины. №721. — Киев, 1992. — 37с.
68. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Мазуренко И.Л. Приближенная модель для расчета переменного магнитного поля произвольного контура с учетом вихревых токов в проводящем полупространстве // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем." — 1999. — Ч.1. — С. 88-93.
69. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Мазуренко И.Л. Аналитический метод расчета электромагнитного поля и плотности потока мощности в системе токовый контур — проводящее полупространство // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2000. — Ч.2. — С.16 — 19.
70. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П., Ризун И.Р. К вопросу расчета магнитного поля элемента электрической цепи, расположенной над проводящей поверхностью // Энергетическое оборудование высоковольтных импульсных установок: Сб. научн. трудов. — К.: Наук. думка, 1985. — С. 41 — 46.
71. Васецкий Ю.М., Емец Ю.П., Ризун И.Р. Пути уменьшения интенсивности импульсного магнитного поля электрогидравлических установок // Теория, эксперимент, практика разрядно импульсной технологии: Сб. научн. трудов. — К.: Наук. думка, 1987. — С.182 — 186.
72. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Мазуренко И.Л. Приближенные математические модели электромагнитных систем с пространственными токовыми контурами, расположенными над проводящей средой // Техн. электродинамика. Тем. вип.: "Проблеми сучасної електротехніки". — 2002. — Ч. 4. — С. 3 — 7.
73. Васецкий Ю.М., Городжса Л.В., Мазуренко И.Л. Оценка параметров для приближенных математических моделей элек-

- тромагнитных систем с вихревыми токами // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 2. — С. 7 — 12.
74. *Васецький Ю.М., Городжса Л.В., Мазуренко І.Л.* Геометрия токових контурів для рівномірного індукційного нагріва плоских металлических изделий обмеженої ширини // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". — 2001. — Ч. 3. — С. 92 — 95.
75. *Васецький Ю.М., Мазуренко І.Л.* Конфігурація просторових контурів зі струмом для забезпечення необхідного характеру тепловиділення у провідному середовищі // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". — 2001. — № 421. — С. 23 — 28.
76. *Подольцев А.Д., Чемерис В.Т.* Границы интегральные уравнения для расчета трехмерного импульсного электромагнитного поля в проводящих средах // Техн. електродинамика. — 1982. — № 2. — С. 15 — 19.
77. *Подольцев А.Д.* Расчет на ЭВМ поверхностного эффекта в массивном контуре прямоугольной конфигурации. // Тез. докладов I-ой конф. по теор. электротехнике. — Ташкент. 1987. — С. 180.
78. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Численный расчет связанных электромагнитных и тепловых нестационарных полей в нелинейных электропроводящих средах / Препринт НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 700. — Киев, 1991. — 27 с.
79. *Подольцев А.Д., Пигнастий С.С.* Влияние скин-эффекта на энергетические показатели импульсного безжелезного трансформатора // Электричество. — 1985. — № 7. — С. 56 — 59.
80. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* Применение интегральных уравнений для расчета неустановившихся электромагнитных полей в движущихся проводящих средах // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1987. — № 6. — С. 116 — 120.
81. *Подольцев А.Д.* Пакет программ ИКДС для расчета электромагнитных и тепловых переходных процессов в системе многовитковый индуктор—массивный концентратор и обрабатываемая деталь. / Препринт ИЭДАН УССР, № 557. — Киев, 1988. — 22 с.
82. *Подольцев А.Д., Эрксенов Н.Х.* Комбинированный метод граничных элементов — конечных разностей для расчета вихревых токов в осесимметричных телах // Изв. вузов. Электромеханика. — № 4. — 1991. — С. 12 — 18.
83. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* Исследование магнитно-импульсного взаимодействия проводящих контуров на ЭЦВМ с учетом движения вторичного контура // Техн. електродинамика. — 1979. — № 1. — С. 22 — 26.
84. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* и др. Математическое моделирование электромеханических и тепловых процессов в магнито-плазменном ускорителе // Теплофизика высоких температур. — 1991. — № 27. — С. 360 — 364.
85. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Кучаев А.А., Дуринин В.А.* Численное моделирование МГД-процессов при электромагнитном перемешивании стали в ковше емкостью 150 тонн / Препр. НАН Украины Ин-т электродинамики; № 770. — Киев, 1995. — 28 с.
86. *Kolesnichenko A.F., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N.* Numerical Simulation of Liquid Metal Motion in Pulse Magnetic Field // Proc. of Symposium on Electromagnetoc Processing of Materials. — 1994. — Nagoya, Japan. — P. 138 — 143.
87. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Расчет и оптимизация МГД-процессов при электромагнитном перемешивании расплавленного металла в секционном токопроводящем кристаллизаторе / Препринт НАН Украины, Ин-т електродинамики; № 803. — Київ, 1997. — 46 с.
88. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ладохин С.В.* Анализ МГД-процессов при электромагнитном перемешивании расплавленного металла в секционном токопроводящем кристаллизаторе // Proc. the 3-d Int. Conf. on Electromechanical and Electrotechnical Systems, Alushta, Ukraine, 1997.
89. *Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski S.M.* Dielectric Properties of 3D composite structure: Simulations versus experiment. // 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — October 20-24, 2002, Mexico. — Pp. 142 — 145.
90. *Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski S.M.* Numerical Calculation of Electric Fields, Losses and Interfacial Charge Densities in Water-Treed Dielectric Composite Structure. // Journal of Electrostatics. — 2004. — Vol. 61. — Pp. 171 — 187.
91. *Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski.* Numerical Simulation and Experimental Study of Frequency-Dependent Dielectric Properties of Composite Material with Stochastic Structure. // IEEE Trans. on Dielectric and Electric Insulation. — 2004. — Vol. 11. — № 3. — Pp. 379 — 389.
92. *Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski.* Numerical Simulations of Dielectric Properties of Composite Material with Periodic Structur. // Journal of Electrostatics. — 2005. — Vol. 63. — Pp. 1073 — 1091.
93. *Подольцев А.Д.* Аналіз трехмерного електрического поля, потерь и поверхности плотности електрических зарядов в полимерній ізоляції з водними триингами // Праці Інституту електродинаміки НАН України. — 2006. — № 3 (15). — С. 93 — 100.
94. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Елементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах. — Київ: Ізд-во Інститута електродинаміки НАН України, 1999. — 363 с.
95. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Численное моделирование распределения импульсного электрического поля и температуры в объеме биологической клетки. // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 2. — С. 7 — 15.
96. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антонец Ю.А., Василець Л.Г.* Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полистиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов. // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність." — 2006. — Ч. 4. — С. 116 — 120.
97. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Численный расчет электромагнитных и тепловых процессов в подземной кабельной линии. Стационарный режим. // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність." — 2006. — Ч. 1. — С. 91 — 95.
98. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Василець Л.Г.* Компьютерное моделирование переходных процессов в высоковольтной кабельной линии с транспозицией экранов. // Техн. електродинаміка. — 2006. — № 6. — С. 3 — 12.
99. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Василець Л.Г.* Компьютерное мо-

- делирование волновых процессов в высоковольтной кабельной линии с неоднородными параметрами. // Техн. електродинаміка. — 2007. — № 1.
100. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование электротепловых процессов в установке индукционного нагрева на двух пространственных уровнях. // Электронное моделирование. — 2007. — № 2. — С. 1 — 15.
101. Широков Н.М., Ращепкин А.П., Назарчук И.В., Крутилин В.А., Лутбина Л.Ю. Внедрение индукционного отжигаленты на Кировском заводе ОЦМ // Цветные металлы. — 1986. — № 5. — С. 90 — 92.
102. Ращепкин А.П., Крутилин В.А., Виштак П.А., Кондратенко И.П., Зинченко Т.Р. Индукционный метод нагрева проката из цветных металлов и сплавов // Цветные металлы. — 1989. — № 1. — С. 104 — 107.
103. Широков Н.М., Крутилин В.А., Певзнер М.Э., Юткин В.М. Опыт использования индукционного протяжного отжига в практике обработки цветных металлов // Цветные металлы. — 1989. — № 1. — С. 101—103.
104. Виштак П.А., Крутилин В.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле в зазоре линейных индукционных машин с концентрическими обмотками // Техн. електродинаміка. — 1984. — № 1. — С. 15 — 20.
105. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Крутилин В.А. Определение электромагнитных полей и энергетических характеристик линейного трехфазного индуктора // Техн. електродинаміка. — 1985. — № 3. — С. 62 — 70.
106. Виштак П.А., Городжа Л.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Влияние поперечного краевого эффекта на джоулево тепловыделение в металле // Техн. електродинаміка. — 1987. — № 6. — С. 6 — 13.
107. Ращепкин А.П., Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Кондратенко И.П. Электромагнитные процессы в концевой зоне линейной индукционной машины при нагреве немагнитной полосы / Сб. науч. тр. Электромагнитные поля в энергетических и технологических установках: — Киев: Ин-т энергосбережения. Ин-т электродинамики АН Украины, 1987. — С. 86 — 91.
108. Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Влияние потоков рассеяния на распределение джоулевых потерь в полосе // Техн. електродинаміка. — 1992. — № 1. — С. 8 — 15.
109. Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Ращепкин А.П.. Расчет электромагнитных полей и тепловыделений в проводящих лентах при переменной величине воздушного зазора // Техн. електродинаміка. — 1991. — № 3. — С.9 — 13.
110. Зинченко Т.Р., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Джоулевы тепловыделения в роторе линейной индукционной машины // Техн. електродинаміка. — 1991. — № 5. — С. 7 — 11.
111. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Нагрев металлической ленты в линейных индукторах с переменными геометрическими размерами // Техн. електродинаміка. — 1997. — № 6. — С. 36 — 39.
112. Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Электромагнитные и тепловые поля при индукционном нагреве лент с температурной зависимостью электропроводности // Техн. електродинаміка. — 1990. — № 6. — С. 3 — 8.
113. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Крутилин В.А., Ращепкин А.П.. Электромагнитные процессы в линейных индукционных машинах при учете изменения электропроводности вторичного тела по длине // Техн. електродинаміка. — 1991. — № 1. — С. 8 — 13.
114. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Влияние асимметрии фазных токов линейного индуктора на равномерность нагрева полосы // Техн. електродинаміка. — 1996. — № 5. — С. 33 — 37.
115. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Индукционный нагрев ферромагнитной полосы в продольном магнитном поле // Техн. електродинаміка. — 1994. — № 3. — С. 3 — 7.
116. Ковбасенко Ю.П., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Исследование электромагнитных процессов в сплошных проводящих средах с нелинейными параметрами // Электричество. — 1989. — № 11. — С. 69 — 71.
117. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Симметрирование электрических параметров линейных асинхронных машин. Постановка и общее решение задачи // Техн. електродинаміка. — 2000. — № 1. — С. 44 — 48.
118. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Симметрирование электрических параметров линейных асинхронных машин. Синтез симметрированной обмотки // Техн. електродинаміка. — 2000. — № 2. — С. 49 — 55.
119. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Индукционный нагрев плоского проката в индукторах с симметризованными электрическими параметрами // Техн. електродинаміка. — 2000. — № 3. — С. 3 — 7.
120. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Энергетические характеристики многополюсных линейных индукционных машин с учетом конечной длины магнитопроводов // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 1. — С. 3 — 9.
121. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Трехфазный индуктор с изменяемым пространственным положением фаз // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Електротехніка. — Київ, 2001. — С. 3 — 8.
122. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Двухобмоточный индуктор бегущего магнитного поля для нагрева плоского проката металлов // Праці Інституту електродинаміки НАН України. — 2005. — № 3(12). — С. 112 — 123.
123. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Электромагнитное поле и силы в однофазных индукторах поперечного магнитного поля для нагрева лент // Техн. електродинаміка. — 2005. — № 5. — С. 9 — 14.
124. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П.. Индукционный нагрев полосы токовыми контурами канонических форм // Техн. електродинаміка. — 2003. — № 1. — С. 63 — 68.
125. Виштак Т.В., Кондратенко И.П.. Электромагнитное поле пространственно распределенного токового контура, расположенного над проводящей полосой // Вісник Кременчуцького державного університету. — Кременчук: КДПУ, 2005. — Вип. 4/2005 (33). — С. 115 — 118.

Надійшла 23.03.07