

В. Р. Соболев
О. Н. Мазуренко

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
КРИОПРОВОДНИКОВ
В НЕОДНОРОДНОМ
СТАЦИОНАРНОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**



МИНСК
«БЕЛАРУСКАЯ НАВУКА»
2003

Соболь В. Р. Электродинамика криопроводников в неоднородном стационарном магнитном поле / В. Р. Соболь, О. Н. Мазуренко. — Мн.: Бел. наука, 2003. — 198 с. ISBN 985-08-0506-9.

Изложены основные понятия физики нормальных металлов и методы их экспериментального и теоретического исследования. Представлены результаты изучения электрических нелинейных свойств криопроводников геометрии Холла и Корбино в неоднородном магнитном поле, как суперпозиции внешнего поля соленоида и поля дрейфа носителей под действием силы Лоренца. Магнитостимулированная неоднородность проводимости изучена с позиций скинирования постоянного тока, вихревой характер которого обусловлен потенциальностью стационарного электрического поля. Перенос заряда большой плотности исследован с учетом магнитодинамических явлений, связанных с действием на движение частиц собственного поля и поля сторонних сил распределенного теплового источника в условиях кризиса кипения хладагента.

Обсуждаются возможности применения полученных результатов в системах коммутации электрических цепей, для накопления и преобразования энергии и при расчете резистивных свойств намоточных материалов, включая композитные проводники на основе высококачественного алюминия.

Рекомендуется для специалистов в области физики металлов, включая низкотемпературную физику и технику криопроводников, для интересующихся проблемами переноса заряда и тепла в анизотропных неоднородных проводящих средах, может быть полезна студентам и аспирантам физико-технических специальностей.

Ил. 74. Библиогр. 146.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Л. Л. Васильев,
доктор физико-математических наук А. С. Каролик

Монография издана при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований

© Соболь В. Р., Мазуренко О. Н.
© Оформление.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современной физике металлов важное место занимают исследования при экстремальных условиях внешнего воздействия, которые включают низкие температуры, сильные стационарные магнитные поля, большие плотности тока. Проведение таких исследований актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. С одной стороны, при низких температурах, когда несущественно влияние тепловых колебаний кристаллической решетки, многие особенности энергетического спектра электронов проводимости проявляются нетрадиционно и приводят к новым эффектам, что позволяет расширять представления об особенностях электромагнитного взаимодействия в таких средах. С другой стороны, нормальные металлы находят все более широкое применение как конструкционные материалы в низкотемпературной энергетике, электромашиностроении, системах ускорения и детектирования элементарных частиц и т. д. Магнитное поле характеризуется не только многогранностью воздействия на электрические свойства проводников и дает широкие возможности исследователям, но и само является технологически неотъемлемым компонентом большинства криогенных устройств и приборов.

В настоящей монографии описываются электронные свойства криопроводников в условиях воздействия на движение зарядов магнитного поля, которое приводит к пространственной неоднородности проводимости, а также к электрической нелинейности. По сути, рассматриваются вопросы электродинамики проводящих анизотропных конденсированных сред с металлическим типом

проводимости в условиях неоднородности тензорных кинетических коэффициентов. Исследование проведено с учетом закона дисперсии носителей заряда реальных металлов, а также особенностей рассеяния частиц на дефектах кристаллической структуры. Анизотропные механизмы рассеяния частиц изменяют вид траекторий носителей заряда и, как следствие, кинетические свойства на макроскопическом уровне.

В работе представлены результаты экспериментального исследования свойств высокочистых алюминия и меди при гелиевых температурах в магнитном поле до 8 Тл для широкого диапазона токовых нагрузок. Анализ проведен на основе макроскопической теории стационарного электромагнитного поля, учитывающей потенциальность поля, тензорный характер материальных уравнений связи, соотношения неразрывности. Достигнутая согласованность между экспериментом и теоретическими моделями не только на качественном, но и на количественном уровне позволила сформулировать концепции некоторых новых явлений для криопроводников, среди которых следующие:

- скинирование тока в пластинчатых проводниках геометрии Холла в условиях пространственной неоднородности проводимости, стимулированной внешним магнитным полем;

- нелинейность электрических характеристик цилиндрических криопроводников геометрии Корбино, обусловленная собственным магнитным полем тока;

- образование стационарных температурно-электрических доменов в режиме генератора тока при кризисе теплообмена между проводником и жидкофазным хладагентом.

Пространственная неоднородность кинетических коэффициентов приводит к нелокальности электронных свойств и описывающих эти свойства характеристик. Это означает, что кинетические коэффициенты (проводимость, удельное электросопротивление, теплопроводность, термоэлектродвижущая сила и т. д.), связывающие усредненные по объему образца термодинамические потоки (плотность потока заряда, плотность потока тепла) и силы (электри-

ческое поле, градиент температуры), существенно отличаются от своих локальных значений в любой из точек объема как по величине, так и по виду зависимости от магнитного поля.

Особое внимание уделяется эффекту скинирования постоянного тока в некомпенсированном металле холловской геометрии. Скинирование означает, что плотность тока неодинакова по объему проводника, и ее максимум локализуется у одной из боковых холловских граней. Причиной статического скин-эффекта является стимулированная магнитным полем неоднородность проводимости вдоль потока заряда. Неоднородность проводимости может быть обусловлена собственно неоднородностью магнитного поля или неоднородностью свойств материала в фактически однородном магнитном поле. Здесь исследуются оба случая. Причем для составных биметаллических проводников композиционного типа определяющим является второй фактор из-за сильного влияния на движение зарядов границы раздела между элементами, на которой компоненты тензорных кинетических коэффициентов, включая и холловскую подвижность, претерпевают скачок. На макроскопическом уровне неоднородное распределение тока приводит к дополнительной диссипации энергии поля и, как следствие, к более высокому уровню резистивности по сравнению с обычным геометрическим усреднением сопротивления проводника. В работе сформулированы принципы потенциометрического определения сопротивления алюминиевого криопроводника в неоднородном магнитном поле. Представлены результаты исследования резистивности пластинчатого композиционного криопроводника на основе алюминия.

Собственный магнетизм движущихся носителей заряда рассмотрен на образцах геометрии Корбино, или дисках, у которых радиальный ток поперечен коаксиальному внешнему магнитному полю. Отсутствие свободных боковых граней исключает электрическое поле Холла, которое, как известно, компенсирует действие силы Лоренца в пластинчатых проводниках. Боковой азимутальный дрейф частиц приводит к квазициклическому движению носителей, когда за время прохода от внутреннего радиу-

са диска к наружному частица совершает множество оборотов в виде раскручивающейся спирали, что эквивалентно появлению дополнительных токовых витков, наподобие обычного проволочного соленоида. Квазицикличность движения частиц обуславливает появление значительного собственного магнитного поля и, как следствие, увеличивает резистивность. В работе рассматривается объемная плотность энергии собственного поля и вводится эффективная индуктивность как коэффициент связи между энергией собственного поля и величиной тока. Исследуется роль геометрических соотношений для цилиндрических проводников и влияние формы образцов на величину аккумулируемой энергии собственного магнитного поля. Магнитодинамическая электрическая нелинейность является следствием совокупного воздействия на движение носителей заряда внешнего магнитного поля и собственного магнитного поля тока.

В условиях низких температур, когда электронная подсистема доминирует в формировании явлений электро- и теплопереноса, возможно возникновение электрической нелинейности тепловой природы. Последняя обусловлена сторонними силами, связанными с неоднородностью тепловых полей. Температурные градиенты возникают при конечной величине теплопроводности и недостаточности мощности отвода тепла при кипении хладагента на поверхности, когда дополнительные тепловые потоки по объему перераспределяют диссипируемую энергию электрического поля. В результате возможно появление температурно-электрических доменов. В таких условиях поведение макроскопических вольт-амперных характеристик обнаруживает стабилизацию напряжения в режиме генератора тока. Температурное упорядочение наблюдается при уровнях тепловыделения, отвечающих кризисным явлениям в кипении гелия, когда немонотонность функции теплоотвода и неоднородность собственного поля дрейфа формируют асимптотически устойчивые термодинамические состояния.

Отсутствие до настоящего времени работ, всесторонне рассматривающих гальваномагнитные свойства криогенных проводников на основе высокочистых нормальных металлов в условиях магнитостимулированной нелокаль-

ности и нелинейности связи между электрическим полем и током, побудило авторов систематизировать и обобщить существующие знания по этой проблеме.

Неоднородность проводимости конденсированных сред, как причина неравномерного распределения постоянного тока по поперечному сечению холловского проводника, впервые была рассмотрена Bate R. T. и Beer A. C. в 60-ых годах. В дальнейшем эта проблематика нашла развитие и отражение в работах ученых Харьковского физико-технического института низких температур Национальной академии наук Украины. Приоритет в изучении магнитодинамической нелинейности электрических свойств объемных образцов некомпенсированных металлов принадлежит научной школе Института физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Беларуси. Значительная доля результатов, определяющих современное понимание проблемы, получена учеными этого института, в котором развитие низкотемпературной тематики в исследовании металлов связано с именем академика Н. Н. Сироты. В конце 70-ых годов Б. Б. Бойко и В. И. Гостищевым было инициировано систематическое комплексное изучение явлений переноса в нормальных металлах в сильных магнитных полях. В развитие представлений по данному кругу вопросов на разных этапах исследования внесли существенный вклад С. Е. Демьянов, А. А. Дрозд, В. С. Кузьмин, В. Н. Хазов. Авторы книги также принадлежат к этой научной школе.

По структуре монография состоит из введения, шести глав и заключения. В первой главе сделан краткий обзор гальваномагнитных свойств проводящих сред, который дает представление о месте и предмете исследования и описывает базовые посылки, на которых строится общая концепция представленной работы.

Во второй главе отражены методологические аспекты исследования, включающие технику низкотемпературного эксперимента, приемы выполнения измерений и систематизации результатов, принципы обобщения полученных закономерностей и аналитические построения.

В третьей — рассмотрено явление статического скин-эффекта в проводнике из поликристаллического алюми-

ния в условиях пространственно-регулярной неоднородности проводимости, которая обусловлена неоднородностью внешнего магнитного поля. Представлено также распространение закономерностей, характерных для алюминия, на другие некомпенсированные криопроводники.

В четвертой — представлены результаты изучения диссипативных процессов в условиях неоднородности проводимости, вызванной неоднородным магнитным полем или изменением кинетических коэффициентов на границе раздела двух металлов с различным типом холловской подвижности. Смоделированы явления протекания тока нормально поверхности раздела и параллельно границе раздела, что имеет место в пластинчатых композитных криопроводниках.

Пятая глава посвящена электрическим нелинейным явлениям магнитодинамической природы. Взаимодействие электронной подсистемы металла с собственным магнитным полем тока и его вклад в макроскопические характеристики исследованы на примере корбинных проводников. Рассмотрены вопросы влияния неоднородности собственного магнитного поля на резистивные свойства.

В шестой главе рассмотрено влияние диссипативных процессов в том числе и при кризисе кипения хладагента на вид вольт-амперных характеристик криопроводников и проанализирована температурно-электрическая устойчивость доменных состояний. Освещены вопросы взаимосвязи гальвано- и термомагнитных явлений при анизотропии теплоотода и действии сторонних электродвижущих сил, стимулированных условиями адиабатичности и изотермичности.

В заключении представлены основные выводы по работе и перечислены возможные области применения полученных результатов.

Хотелось бы выразить благодарность всем, кто так или иначе способствовал написанию этой книги — академику Б. Б. Бойко и доктору физико-математических наук В. И. Гостищеву, которые являлись инициаторами этих исследований. К сожалению, их уже нет рядом с нами. Мы признательны докторам физико-математических наук С. Е. Демьянову и В. С. Кузьмину, внесшим сущест-

венный вклад в построение концепции низкотемпературных гальваномагнитных нелокальных и нелинейных явлений. Исследование было бы невозможно без технической помощи главных криогеников отдела А. А. Дрозда и кандидата технических наук М. Л. Петровского. Все эти люди являются соавторами многих работ, процитированных или изложенных здесь. Мы благодарны рецензентам — доктору технических наук, профессору Л. Л. Васильеву и доктору физико-математических наук А. С. Каролик, высказавшим важные замечания и советы по улучшению рукописи, а также всем, принявшим участие в полезных дискуссиях и в первую очередь докторам физико-математических наук, профессору И. И. Наркевичу (БГПУ), А. П. Сайко (ИФТТП НАНБ), профессору В. И. Прокошину (БРФФИ), профессору В. Г. Шепелевичу (БГУ), профессору И. С. Ташлыкову (БГПУ) и Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку основной части исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрикосов А. А.* Основы теории металлов. М.: Наука, 1987.
2. *Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И.* К теории гальваномагнитных явлений в металлах // ЖЭТФ. — 1956. — Т. 31, Вып. 1(7). — С. 63—79.
3. *Лифшиц И. М., Песчанский В. Г.* Гальваномагнитные характеристики металлов с открытыми поверхностями Ферми // ЖЭТФ. — 1958. — Т. 35, Вып. 5. — С. 1251—1264.
4. *Азбель М. Я., Каганов М. И., Лифшиц И. М.* Теплопроводность и термоэлектрические явления в металлах в магнитном поле // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32, Вып. 5. — С. 1188—1192.
5. *Бычков Ю. А., Гуревич Л. Э., Недлин Г. М.* Термоэлектрические явления в сильных магнитных полях в металлах с различными поверхностями Ферми // ЖЭТФ. — 1959. — Т. 37, Вып. 2(8). — С. 534—539.
6. *Крэнелл А., Уонг К.* Поверхность Ферми. М.: Атомиздат, 1978.
7. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела. Т. 1. — М.: Мир, 1979.
8. *Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.* Измерение электропроводности металлов в магнитном поле, как метод исследования поверхности Ферми // ЖЭТФ. — 1959. Т. 37, Вып. 3 (9). — С. 672—677.
9. *Барабанов А. Ф., Максимов Л. А.* О вычислении кинетических коэффициентов металлов с учетом нескольких моментов // ФММ. — 1970. — Т. 29, Вып. 3. — С. 471—478.
10. *Каган Ю., Флеров В. Н.* К теории сопротивления и магнетосопротивления металлов при низких температурах // ЖЭТФ. — 1974. — Т. 66, Вып. 4. — С. 1374—1386.
11. *Ashcroft N. W.* The reversal of Hall fields in aluminium and indium // Phys. Condens. Matter. — 1969. — Vol. 9. — P. 45—53.

12. Мазуренко О. Н. Поле Холла и анизотропия рассеяния электронов в алюминии // Высокочистые вещества. — 1987. — № 4. — С. 60—63.
13. Боровик Е. С., Волоцкая В. Г. Анизотропия гальваномагнитных свойств чистого алюминия в больших эффективных полях // ЖЭТФ. — 1965. — Т. 48, Вып. 6. — С. 1554—1561.
14. Fickett F. R. The magnetoresistance of very pure polycrystalline aluminium // Phys. Rev. — 1971. — Vol. 3B, N 6. — P. 1941—1952.
15. Amundsen T., Jerstad P. Linear magnetoresistance of aluminium // J. Low Temp. Phys. — 1973. — Vol. 15, N 5/6. — P. 459—471.
16. Копелиович А. И., Моргуи В. Н. О линейном росте сопротивления алюминия в сильном магнитном поле // ФНТ. — 1978. — Т. 4, № 2. — С. 163—172.
17. Гуржи Р. Н., Копелиович А. И. Низкотемпературная электропроводность чистых металлов // УФН. — 1981. — Т. 133, Вып. 1. — С. 33—74.
18. Гостищев В. И., Демьянов С. Е., Соболев В. Р. Магнетосопротивление алюминия при пластической деформации // ФНТ. — 1984. — Т. 10, № 9. — С. 994—997.
19. Dovygallo I., Belsky S., Sobol V. On the physical nature of frequency dependence of the cyclic strength of metallic materials // Proceed. IV International symposium «Creep and coupled processes», Bialystok, Poland, 25—27 Sept. 1992. — Bialystok, 1992. — P. 47—52.
20. Гостищев В. И., Демьянов С. Е., Соболев В. Р. Деформационный механизм рассеяния и функция распределения электронов проводимости в алюминии // ФММ. — 1985. — Т. 60, Вып. 1. — С. 71—76.
21. Гостищев В. И., Дрозд А. А., Соболев В. Р. Низкотемпературный теплоперенос в алюминии в магнитном поле // Теплофизические свойства веществ: Труды VIII Всесоюз. конф. / СО АН СССР. Институт теплофизики. — Новосибирск, 1989. — С. 179—185.
22. Гантмахер В. Ф., Гаспаров В. А. Анизотропия вероятности рассеяния электронов фононами на Ферми поверхности меди // ЖЭТФ. — 1973. — Т. 64, Вып. 5. — С. 1712—1723.
23. Rumbo E. R. Transport properties of very pure copper and silver below 8.5 K // J. Phys. F: Metal Phys. — 1976. — Vol. 6, N 1. — P. 85—98.
24. Соболев В. Р., Матвеев В. Н. Термо-э.д.с. меди в магнитном поле // ФНТ. — 1986. — Т. 12, № 1. — С. 98—100.
25. Ильевский В. И., Копелиович А. И. Магнитотермо-э.д.с. фононного увлечения в некомпенсированных металлах с открытыми поверхностями Ферми при низких температурах // ФНТ. — 1987. — Т. 13, № 2. — С. 143—154.

26. Демьянов С. Е., Соболев В. Р., Дрозд А. А., Матвеев В. Н. Дислокационное рассеяние и перенос заряда в меди // ФНТ. — 1986. — Т. 12, № 3. — С. 315—319.
27. Steenwyk S. D., Rowlands J. A., Schroeder P. A. Effect of impurities and dislocations on the temperature-dependent resistivity of the noble metals // J. Phys. F: Metal Phys. — 1981. — Vol. 11, N. 8. — P. 1623—1633.
28. Демьянов С. Е., Соболев В. Р. Взаимосвязь деформационного и температурного механизмов релаксации в меди // Металлофизика. — 1987. — Т. 9, № 6. — С. 20—23.
29. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир, 1971.
30. Дыхне А. М. О вычислении кинетических коэффициентов сред со случайными неоднородностями // ЖЭТФ. — 1967. — Т. 52, Вып. 1. — С. 264—266.
31. Корж С. А. О сопротивлении поликристаллов в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. — 1970. — Т. 59, Вып. 2(8). — С. 510—515.
32. Дрейзин Ю. А., Дыхне А. М. Аномальная проводимость неоднородных сред в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. — 1972. — Т. 63, Вып. 1(7). — С. 242—260.
33. Азбель М. Ю., Песчанский В. Г. Сопротивление тонких пластин и проволок в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. — 1965. — Т. 49, Вып. 2(8). — С. 572—587.
34. Песчанский В. Г., Азбель М. Я. Магнетосопротивление полуметаллов // ЖЭТФ. — 1968. — Т. 55, Вып. 5. — С. 1980—1996.
35. Гостищев В. И., Дрозд А. А., Соболев В. Р., Криворучко Т. А. Размерный и частотный эффекты в алюминии // ФММ. — 1986. — Т. 61, Вып. 5. — С. 1038—1040.
36. Зайцев Г. А., Степанова С. В., Хоткевич В. И. Магнетосопротивление и статический скин-эффект в монокристаллах кадмия // ЖЭТФ. — 1965. — Т. 48, Вып. 2. — С. 760—761.
37. Кириченко О. В., Песчанский В. Г., Савельева С. Н. Статический скин-эффект в металлах с открытыми поверхностями Ферми // ЖЭТФ. — 1979. — Т. 77, Вып. 5. — С. 2045—2060.
38. Волкенштейн Н. В., Марченков В. В., Старцев В. Е. и др. Эффект Холла при статическом скин-эффекте // Письма в ЖЭТФ. — 1985. — Т. 41, Вып. 9. — С. 376—378.
39. Кудинов В. А., Мойжес Б. Я. Влияние случайных неоднородностей на измерения термоэдс и коэффициента Нернста в сильном магнитном поле // ФТТ. — 1965. — Т. 7, Вып. 7. — С. 2309—2317.
40. Гальперин Ю. М., Лайхтман Б. Д. Влияние микрон неоднородностей на кинетические эффекты в полупроводниках с

высокой подвижностью // ФТТ. — 1971. — Т. 13. Вып. 7. — С. 2102—2108.

41. *Bate R. T., Beer A. C.* Influence of conductivity gradients on galvanomagnetic effects in semiconductors // *J. Appl. Phys.* — 1961. — Vol. 32, N 5. — P. 800—805.

42. *Beer A. C.* Galvanomagnetic effects in semiconductors — New York: Academic Press. — 1963. — 418 p.

43. *Коньков В. Л., Павлов Н. И.* Эффект Холла в полупроводниках в неоднородном магнитном поле // *Изв. ВУЗов. Физика.* — 1969. — № 12. — С. 121—123.

44. *Богод Ю. А., Красовицкий Вит. Б., Лемешевская Е. Т.* Скинирование постоянного тока в неоднородных монокристаллах висмута // *ФНТ.* — 1985. — Т. 11, № 2. — С. 161—165.

45. *Богод Ю. А., Красовицкий Вит. В., Лемешевская Е. Т.* Скинирование теплового потока в полуметаллах // *ФНТ.* — 1987. — Т. 13, № 9. С. 1087—1089.

46. *Stroud D., Pan F. P.* Magnetoresistance and Hall coefficient of inhomogeneous metals // *Phys. Rev. B.* — 1979. — Vol. 20, N 2. — P. 455—465.

47. *Sampsel J. B., Garland J. C.* Current distortion effects and linear magnetoresistance of inclusions in free-electron metals // *Phys. Rev. B.* — 1976. — Vol. 13, N 2. — P. 583—589.

48. *Beers C. J., van Dongen J. C. M., van Kempen H., Wyder P.* Influence of voids on the linear magnetoresistance of indium // *Phys. Rev. Lett.* — 1978. — Vol. 40, N 18. — P. 1194—1197.

49. *Bruls G. J. C. L., Bass J., van Gelder A. P. et al.* Linear magnetoresistance due to sample thickness variations: Applications to aluminum // *Phys. Rev. B.* — 1985. — Vol. 32, N 4. — P. 1927—1939.

50. *Балагуров Б. Я.* Гальваномагнитные свойства неоднородных сред в слабом магнитном поле // *ЖЭТФ.* — 1987. — Т. 93, Вып. 5(11). — С. 1888—1903.

51. *Фокин А. Г.* Проводимость случайно неоднородной среды // *ЖЭТФ.* — 1993. — Т. 104, Вып. 3(9). — С. 3178—3192.

52. *Баранов С. А.* Обобщенная проводимость и оптимальное выделение энергии // *ЖТФ.* — 1999. — Т. 69, Вып. 7. — С. 128—133.

53. *Балагуров Б. Я.* Эффективные электрические характеристики двумерной трехкомпонентной двоякопериодической системы с включениями круговой формы // *ЖЭТФ.* — 2001. — Т. 119, Вып. 1. — С. 142—153.

54. *Балагуров Б. Я.* К теории проводимости композитов с двумерной периодической структурой // *ЖЭТФ.* — 2001 — Т. 120, Вып. 3(9). — С. 668—677.

55. Балагуров Б. Я., Кашин В. А. К теории магнитосопротивления бинарных композитов в слабом магнитном поле. Результаты численного эксперимента // ЖЭТФ. — 2002. — Т. 121, Вып. 3. — С. 770—778.

56. Емец Ю. П. Электрические характеристики композиционных материалов с регулярной структурой. Киев.: Наукова думка, 1986.

57. Гостищев В. И., Дрозд А. А., Демьянов С. Е. Распределение электрического поля в алюминии в сильных магнитных полях // ФНТ. — 1978. — Т. 4, № 9. — С. 1131—1142.

58. Гостищев В. И., Демьянов С. Е., Дрозд А. А., Мазуренко О. Н. и др. Токовые вихри в металлах в неоднородном магнитном поле // ФММ. — 1984. — Т. 57, Вып. 4. — С. 699—706

59. Гостищев В. И., Дрозд А. А., Кузьмин В. С., Мазуренко О. Н. и др. Кинетические свойства Al в неоднородных магнитных полях // ФНТ. — 1985. — Т. 11, № 1. — С. 75—79.

60. Гостищев В. И., Демьянов С. Е., Дрозд А. А., Мазуренко О. Н. и др. Инверсия поля Холла и электроперенос в алюминии // ЖТФ. — 1988. — Т. 58, Вып. 4. — С. 787—791.

61. Кулеско Г. И. Гальваномагнитные явления вблизи общей границы бикристаллов цинка // Письма в ЖЭТФ. — 1979. — Т. 30, Вып. 10. — С. 641—644.

62. Eckels P. W., Iyer N. C., Patterson A. et al. Magnetoresistance: the Hall effect in composite aluminum cryoconductors // Cryogenics. — 1989. — Vol. 29, N 7. — P. 748—752.

63. Fickett F. R., Thompson C. A. Anomalous magnetoresistance in Al/Al-alloy composite conductors // Adv. Cryog. Eng. — 1990. — Vol. 36. — P. 671—678.

64. Kaneko H., Yanagi N. Enhancement of magnetoresistance due to Hall current in aluminium-copper composite // Cryogenics. — 1992. — Vol. 32, N 12. — P. 1114—1120.

65. Kaneko H. Hall current in aluminum-copper composite // Adv. Cryog. Eng. (Mater). — 1994. — Vol. 40A. — P. 451—458.

66. Kaneko H. Insulation of highly conductive metal in composite stabilizer for reduction of Hall current across surface // Cryogenics. — 1993. — Vol. 33, N 11. — P. 1077—1085.

67. Christianson O. R., Parker J. H. Anomalous magnetoresistance mechanisms // Adv. Cryog. Eng. (Mater). — 1994. — Vol. 40A. — P. 425—434.

68. Krefka M. P., Christianson O. R., Parker J. H. Steady-state Hall losses in composite cryogenic conductors // Cryogenics. — 1996. — Vol. 36, N 4. — P. 291—301.

69. Романовский В. Р. Тепловыделение в устойчивом сверхпроводящем состоянии при вводе тока в композитном сверхпроводнике // ЖТФ. — 1999. — Т. 69, Вып. 4. — С. 125—132.

70. *Dotsenko V. I., Kislyak J. F., Petrenko V. T. et al.* Static stress effects in superconducting composites. Part I. Effects of uniaxial tensile and compressive stresses on critical temperatures of Cu-Nb, Cu-NbTi and bronze-Nb₃Sn composites // *Cryogenics*. — 2001. — Vol. 41, N 4. — P. 219—224.

71. *Romanovski V. R.* Peculiarities of transport current penetration in a composite superconductor taking into account different models of flux creep // *Cryogenics*. — 2002. — Vol. 42, N 1. — P. 29—37.

72. *Cochran J. F., Shiffman C. A.* Effect of combined d. c. and r. f. magnetic fields upon the skin depth of gallium // *Bull. Am. Phys. Soc.* — 1965. — Vol. 10. — P. 110—111.

73. *Cochran J. F., Shiffman C. A.* Magnetic field dependence of the rf skin depth of gallium // *Phys. Rev. Ser. A* — 1965. — Vol. A 140. — P. 1678—1688.

74. *Долгополов В. Т.* Нелинейные эффекты в металлах в условиях аномального скина // *УФН*. — 1980. — Т. 130, Вып. 2. — С. 241—278.

75. *Волошин И. Ф., Подлевских Н. А., Скобов В. Г., Фишер Л. М. и др.* Нелинейное магнитное затухание Ландау // *Письма в ЖЭТФ*. — 1986. — Т. 44, Вып. 3. — С. 136—138.

76. *Волошин И. Ф., Кравченко С. В., Фишер Л. М.* О токовых состояниях в металлах на низких частотах // *ЖЭТФ*. — 1987. — Т. 92, Вып. 3. — С. 1050—1060.

77. *Шабанский В. П.* Об отклонениях от закона Ома в металлах // *ЖЭТФ*. — 1954. — Т. 27, Вып. 2(8). — С. 147—155.

78. *Yaqub M., Cochran J. F.* Current dependence on the resistance in small gallium single crystals // *Phys. Rev. Lett.* — 1963. — Vol. 10, N 9. — P. 390—392.

79. *Волошин И. Ф., Кравченко С. В., Подлевских Н. А., Фишер Л. М.* О нелинейном сопротивлении тонких металлических образцов // *ЖЭТФ*. — 1985. — Т. 89, Вып. 1. — С. 233—241.

80. *Канер Э. А., Снапиро И. Б., Ямпольский В. А.* Нелинейная вольт-амперная характеристика тонкой металлической проволоки // *ФНТ*. — 1985. — Т. 11, № 5. — С. 477—482.

81. *Канер Э. А., Леонов Ю. Г., Макаров Н. М., Ямпольский В. А.* Магнитодинамическая нелинейность и пинч-эффект в металлах // *ЖЭТФ*. — 1987. — Т. 93, Вып. 1(12). — С. 2020—2031.

82. *Песчанский В. Г., Оямада К., Полевич В. В.* О нелинейных эффектах в тонких проводниках // *ЖЭТФ*. — 1974. — Т. 67, Вып. 5. — С. 1989—2000.

83. *Песчанский В. Г., Степаненко Д. И.* Продольное магнитосопротивление проводников при больших плотностях тока // *ФНТ*. — 1989. — Т. 15, № 12. — С. 1271—1279.

84. *Песчанский В. Г., Оямада К., Степаненко Д. И.* Нелинейное магнитосопротивление компенсированных металлов // ФНТ. — 1991. — Т. 17, № 3. — С. 328—330.
85. *Бойко Б. Б., Гостищев В. И., Дрозд А. А., Мазуренко О. Н. и др.* Корбино эффект в алюминии // ФММ. — 1987. — Т. 63, Вып. 6. — С. 1133—1137.
86. *Слуцкий А. А., Кадигров А. М.* Электрические домены в металлах при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. — 1978. — Т. 28, Вып. 4. — С. 219—222.
87. *Жуков С. А., Барелко В. В., Мержанов А. Г.* К теории волновых процессов на тепловыделяющих поверхностях при кипении жидкостей // ДАН СССР. — 1978. — Т. 242, № 5. — С. 1064—1067.
88. *Барелко В. В., Бейбутян В. М., Володин Ю. Е., Зельдович Я. Б.* Об эффекте баретирования // ДАН СССР. — 1981. — Т. 257. — С. 339—343.
89. *Цян Ю. Н., Логвинов И. И.* Наблюдение температурного домена электрического поля в металлическом образце // ФНТ. — 1982. — Т. 8, № 7. — С. 774—777.
90. *Бойко В. В., Подрезов Ю. В., Климова Н. П.* Домены электрического поля в металле при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. — 1982. — Т. 35, Вып. 12. — С. 309—311.
91. *Абрамов Г. И., Гуревич А. В., Дзугутов В. М. и др.* Температурно-электрические домены в металлах // Письма в ЖЭТФ. — 1983. — Т. 37, Вып. 10. — С. 453—456.
92. *Романовский В. Р.* Кинетика необратимого распространения тепловой неустойчивости при неоднородном распределении температуры в поперечном сечении сверхпроводящего композита // ЖТФ. — 1998. — Т. 68, Вып. 1. — С. 53—58.
93. *Артемов А. Н., Медведев Ю. В.* Диаграмма стационарных состояний слоистых сверхпроводников с током // ФНТ. — 2002. — Т. 28, Вып. 4. — С. 349—354.
94. *Anashkin V. E., Keilin M. L., Surin M. J. et al.* The development and investigation of superconducting magnetic systems for physical experiments // Cryogenics. — 1979. — Vol. 19, N 7. — P. 405—410.
95. *Kleinman D. A., Schawlov A. L.* Corbino disk // J. Appl. Phys. — 1960. — Vol. 31. — P. 2176—2187.
96. *Carver G. P.* A corbino disk apparatus to measure Hall mobilities in amorphous semiconductors // Rev. Sci. Instrum. — 1972. — Vol. 43. — P. 1257—1263.
97. *De Lang H. M., van Kempen H., Wyder P.* The lattice thermal conductivity of very pure aluminium // J. Phys. F: Metal Phys. — 1978. — Vol. 8. — P. L39—L42.

98. Морзун В. Н., Чеботаев Н. Н. Экспоненциальная температурная зависимость магнитосопротивления высокочистого алюминия в сильных магнитных полях // ФНТ. — 1992. — Т. 18, № 2. — С. 140—143.

99. Волокобинский М. Ю. Электрическое поле в линейно-неоднородных диэлектриках // ДАН СССР. — 1991. — Т. 316, № 1. — С. 96—100.

100. Мазуренко О. Н., Соболев В. Р., Дрозд А. А. Воздействие градиентного магнитного поля на электроперенос в гиперпроводящем Al // Современная технология гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводниковой электроники: Материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Нарочь, 24—27 сент. 1994. — Мн., 1994. — С. 189—192.

101. Мазуренко О. Н., Соболев В. Р., Дрозд А. А. Магнитодинамика электронов проводимости Al в неоднородном поле // ФНТ. — 1995. — Т. 21, № 1. — С. 78—85.

102. Гуржи Р. Н., Копелиович А. И. О гальваномагнитных свойствах металлов с закрытыми поверхностями Ферми при низких температурах // ЖЭТФ. — 1974. — Т. 67, Вып. 6(12). — С. 2307—2321.

103. Дмитриев В. М., Пренцлау Н. Н., Лебедева И. Л. Индуцированные пластической деформацией низкотемпературные аномалии электрического сопротивления поликристаллов меди и алюминия // ФНТ. — 2001. — Т. 27, Вып. 6. — С. 657—667.

104. Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A. Magnetostimulated inhomogeneity of electric field in aluminum // Advances in Cryogenic Engineering. — 1996. — Vol. 42. — P. 1071—1078.

105. Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A. Inhomogeneity and local negative magnetoresistance of aluminum // Proceedings of the 16th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, 20—24 May, 1996, Part 3. — P. 1945—1948.

106. Mazurenko O. N., Drozd A. A. Inhomogeneity and local negative magnetoresistance of aluminum // Czechoslovak J. of Physics. — 1996. — Vol. 46(S5). — P. 2549—2550.

107. Соболев В. Р., Мазуренко О. Н., Дрозд А. А. Магнитостимулированная неоднородность проводимости и нелокальные явления переноса в металлах // ФНТ. — 1999. — Т. 25, № 11. — С. 1211—1217.

108. Sobol V. R., Mazurenko O. N., Zoli M. Spatial inversion of gyrotropy parameter in conductivity tensor and charge transport peculiarities // Proceedings of the Bianisotropics 2000. 8th International Conference of Electromagnetics of Complex Media, Lisbon. 27—29 September, 2000. — P. 115—118.

109. *Соболь В. Р., Мазуренко О. Н., Золи М.* Скинирование постоянного тока в некомпенсированных металлах // 32 Всероссийское совещание по физике низких температур (НТ-32), Казань, 3–6 окт. 2000: Тез. докл. — Казань, 2000. — С. 121–122.

110. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A.* On excessive resistance and heat generation of aluminum conductor due to magnetic field inhomogeneity // *Advances in Cryogenic Engineering*. — 1998. — Vol. 44. — P. 975–981.

111. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Zoli M.* Magnetostimulated anisotropy of conductivity and Corbino-like current in composite conductors. // *Proceedings of the Bianisotropics 2000. 8th International Conference of Electromagnetics of Complex Media, Lisbon. 27–29 September, 2000.* — P. 119–122.

112. *Соболь В. Р., Мазуренко О. Н., Золи М.* Ток Холла и потери в композитном криопроводнике // 32 Всероссийское совещание по физике низких температур (НТ-32), Казань, 3–6 октября 2000: Тез. докл. — Казань, 2000. — С. 119–120.

113. А. С. 1056395 СССР, МКИ Н 02 М 7/02 // Н 01 L 49/00. Преобразователь переменного тока в постоянный / В. И. Гостищев, В. Н. Хазов, А. А. Дрозд и др. — № 3476052/24-07; Заявлено 28.07.82; Опубл. 23.11.83, Бюл. № 43 // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 43. — С. 219.

114. А. С. 1064465 СССР, МКИ Н 03 К 17/92. Бесконтактный электромагнитный переключатель / В. И. Гостищев, В. Н. Хазов, А. А. Дрозд и др. — № 3410472/18-21; Заявлено 09.03.82; Опубл. 30.12.83, Бюл. № 48 // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 48. — С. 221–222.

115. Металлоэлектронные переключатели для управления сильноточными электросистемами / В. И. Гостищев, С. Е. Демьянов, А. А. Дрозд и др. // Прямое преобразование различных видов энергии в электрическую. Инф. бюллетень ВИНТИ АН СССР. — 1986. — № 1. — С. 20–29.

116. *Дрозд А. А., Соболь В. Р., Пашик Д. В.* Об измерении параметров сильного неоднородного магнитного поля // VII Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры»: Тез. докл. Ленинград, 24–26 окт. 1989. — Ленинград, 1989. Ч. I. — С. 184–185.

117. *Соболь В. Р., Кабанов А. А.* Нелинейность магнитного поля и вихревой ток в преобразователе Холла // Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике (МТЭ и ТП-90): Тез. науч.-техн. конф. Минск, 23–24 окт. 1990. — Мн., 1990. Ч. II. — С. 47–48.

118. *Мазуренко О. Н., Соболь В. Р., Устинович Д. Ф.* Физические основы работы материала интегрального полупроводнико-

вого датчика магнитного поля // Материаловедение. — 2002. — 3 (60). — С. 2—5.

119. *Гостищев В. И., Дрозд А. А., Соболев В. Р.* Особенности низкотемпературного теплосопротивления алюминия в магнитном поле // ФНТ. — 1988. — Т. 14, № 6. — С. 594—598.

120. *Gostishchev V. I., Demyanov S. E., Sobol V. R. et al.* On the anisotropy of electron-dislocation scattering in aluminum in charge transport // Phys. Stat. Sol. — 1990. — Vol. B160. — P. K133—K136

121. *Boiko B. B., Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A.* Magnetosensitive conductivity of aluminum and the advantage of Corbino geometry // Advances in Cryogenic Engineering. — 1996. — Vol. 42. — P. 1063—1069.

122. *Sobol V. R., Boiko B. B.* Magnetic non-linearity at strong Hall drift // Czechoslovak Journal of Physics. — 1996. — Vol. 46(S4). — P. 2033—2034.

123. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Zoli M.* Nonlinear dynamics of carriers in aluminum cryoconductors under the action of crossed electric and magnetic field // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2000. — Vol. 3, N 2. — P. 181—187.

124. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 1982.

125. *Соболев В. Р., Мазуренко О. Н.* Магнитодинамическая нелинейность электрических свойств некомпенсированных металлов // ФНТ. — 2001. — Т. 27, № 1. — С. 60—67.

126. *Boiko B. B., Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A.* Magnetism due to Hall current in aluminum and copper conductors // Proceedings of the 16th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, 20—24 May, 1996, Part 3, P. 1953—1956.

127. *Boiko B. B., Sobol V. R., Mazurenko O. N.* Magnetic field of cyclic current in cylinder conductors // Proceedings of the 16th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, 20—24 May, 1996, Part 3, — P. 1949—1952.

128. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A., Boiko B. B.* Energy storage in metal devices and the advantages of liquid hydrogen temperatures // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). — 1997. — Vol. 10, N 3. — P. 277—282.

129. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A., Boiko B. B.* Novel concept of concentrator of magnetic energy // Advances in Cryogenic Engineering. — 1998. — Vol. 43. — P. 325—331.

130. *Соболев В. Р.* О возникновении упорядоченной температурной структуры в металлах, разогреваемых электрическим током, при кризисе кипения криогенной жидкости // Кризисы теплообмена при кипении: Тез. докл. I Всесоюз. семинара, Новосибирск, 19—21 июля 1989. — Новосибирск, 1989. — С. 109—111.

131. *Sobol V. R., Krivoruchko T. A., Kukharenko L. V., Mazurenko O. N. et al.* The temperature fields in electrically heated wires at crisis of boiling // Proceedings of Second Annual Seminar Nonlinear phenomena in complex systems: Fractals, chaos, attractors, bifurcations, phase transition, self-organization. Polatsk, 15—17 Febr. 1993. — SPb. — P. 454—458.

132. *Лапшин Р. М., Макаров Г. Ю., Шемагин И. А.* О возможности существования периодического температурного поля при электрическом обогреве // ИФЖ. — 1982. — Т. 42, № 5. — С. 825—827.

133. *Гостищев В. И., Дрозд А. А., Соболев В. Р. и др.* Нелинейные вольт-амперные характеристики металлических образцов в магнитном поле // ФММ. — 1985. — Т. 60, Вып. 4. — С. 742—746.

134. *Соболев В. Р., Криворучко Т. А.* Особенности низкотемпературного переноса заряда и тепла в металлах в магнитном поле // Теплофизические свойства веществ: Тр. VIII Всесоюз. конф. — Новосибирск, 1989. Ч. II. — С. 158—164.

135. *Соболев В. Р., Солонович В. К.* О теплопереносе в монокристаллических образцах переходных металлов при джоулевом обогреве // XIII Всесоюз. совещ. «Получение, структура, физические свойства и применение высокочистых и монокристаллических тугоплавких и редких металлов»: Тез. докл. Суздаль, 2—4 окт. 1990. — М., 1990. — С. 55.

136. *Соболев В. Р., Криворучко Т. А.* О переносе тепла в анизотропных металлических средах // ИФЖ. — 1990. — Т. 58, № 4. — С. 670—675.

137. *Соболев В. Р., Мазуренко О. Н., Солонович В. К.* Низкотемпературные термомагнитные явления в металлах в условиях джоулевого разогрева // ИФЖ. — 1994. — Т. 67, № 3—4. — С. 334—339.

138. *Jergel M., Stevenson R.* Static heat transfer to liquid helium in open pools and narrow channels // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1971. — Vol. 14, N 12. — P. 2099—2107.

139. *Jergel M., Stevenson R.* Heat transfer to boiling helium from aluminium surface // Cryogenics. — 1972. — Vol. 12, N 4. — P. 312—313.

140. *Григорьев В. А., Павлов Ю. М., Аметистов Е. В.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977.

141. *Boiko B. B., Sobol V. R., Mazurenko O. N.* On the appearance of space temperature electric structures in hyperconductors under high magnetic fields // Proceedings of Second Annual Seminar Nonlinear phenomena in complex systems: Fractals, chaos, attractors, bifurcations, phase transition, self-organization. Polatsk, 15—17 Febr. 1993. — SPb. — P. 445—453.

142. *Бойко Б. Б., Соболев В. Р., Мазуренко О. Н., Дрозд А. А.* Гальваномагнитные явления в гиперпроводниках геометрии Корбино при кризисе кипения // Докл. АН Беларуси. — 1994. — Т. 38, № 3. — С. 33—36.

143. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A.* Temperature structures at high Hall drift in aluminum // Proceedings of the 16th ICES/ICMC, Kitakyushu, Japan, 20—24 May, 1996, Part 3, P. 1941—1944.

144. *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. М.: Мир, 1974.

145. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. М.: Мир, 1990.

146. *Sobol V. R., Mazurenko O. N., Drozd A. A.* Galvanomagnetic properties of metals at the heat exchange crisis at boiling of liquid helium // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). — 1997. — Vol. 10, N 3. — P. 291—296.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	10
Глава 1. Криопроводники и их свойства в магнитном поле	13
1.1. Общие положения.....	13
1.2. Пространственная неоднородность проводимости и особенности переноса заряда в магнитном поле.....	23
1.3. Сопротивление криопроводников в условиях воздействия неоднородного магнитного поля.....	30
1.4. Нелинейные явления при переносе заряда в проводящих конденсированных средах.....	35
1.5. Электрическая нелинейность в металлах при джоулевом разогреве.....	38
Глава 2. Концепция работы, методологические аспекты измерений и анализа	43
2.1. Основные методологические принципы.....	43
2.2. Низкотемпературные измерения, формирование экспериментальных баз данных.....	45
2.3. Моделирование регулярной неоднородности проводимости методом искривления токовых линий.....	46
2.3.1. Кусочно-линейная аппроксимация профиля образца.....	48
2.3.2. Аналитический способ определения профиля.....	49
2.3.3. Численные методы расчета профиля образца.....	50

2.3.4. Изготовление образцов, потенциальные контакты, ориентирование в магнитном поле соленоида	51
2.4. Методология и техника моделирования нелинейных явлений	53
2.4.1. Геометрия Корбино как способ усиления динамического магнетизма	54
2.4.2. Методы и приемы изучения температурно-электрической нелинейности	58
Глава 3. Магнитостимулированная пространственная неоднородность проводимости и соотношения нелокальности при переносе заряда	62
3.1. Линейная неоднородность магнитного поля в алюминии и приближение изотропного закона дисперсии	63
3.2. Анизотропия закона дисперсии электронов и большой масштаб градиентности магнитного поля	69
3.2.1. Экспоненциальный и квазиквадратичный законы изменения поля	69
3.2.2. Грань слабого сигнала и инверсия знака электрического поля	72
3.2.3. Общая концепция вихревого тока	74
3.3. Скинирование тока при инверсии вектора магнитного поля и его градиента	79
3.4. Влияние степени открытости изоэнергетической поверхности на уровень скинирования	85
3.5. Заключительные замечания по результатам главы	88
Глава 4. Воздействие неоднородности магнитного поля на сопротивление криопроводников и композиционных материалов на их основе	89
4.1. Сопротивление алюминиевого криопроводника в неоднородном магнитном поле	90
4.2. Композиционный криопроводник на основе алюминия	97
4.2.1. Антисимметрия тензоров сопротивления элементов композиционного материала	98
4.2.2. Пластинчатый криопроводник алюминий-медь	102

4.3. Возможности применения эффектов скинирования постоянного тока на практике	108
4.4. Заключительные замечания по результатам главы	114

Глава 5. Электромагнитное поле постоянного тока и нелинейность электрических свойств некомпенсированных металлов

5.1. Квазициклическое движение частиц в магнитном поле	115
5.1.1. Открытые траектории и магниторезистивный эффект в алюминии и меди	116
5.1.2. Потенциал электрического поля и магнитодинамическая нелинейность в алюминии	120
5.2. Магнитное поле азимутального дрейфа в проводниках из алюминия и меди	127
5.2.1. Магнитное поле проводника в форме диска	127
5.2.2. Энергия поля азимутального дрейфа и его характеристики	131
5.3. Форма цилиндра Корбино и эффективность генерации собственного поля	134
5.3.1. Тонкий диск как плоский виток с током	134
5.3.2. Проводники Корбино непрямоугольного осевого сечения	137
5.4. Заключительные замечания по результатам главы	142

Глава 6. Тепловые аспекты магнитодинамической нелинейности электрических свойств при кризисе кипения

6.1. Температурно-электрические поля в проводниках геометрии Холла	144
6.1.1. Квазистационарные структуры при охлаждении жидким азотом	145
6.1.2. Магнитоэлектрическая нелинейность в алюминии и меди	148
6.2. Сторонние электродвижущие силы при анизотропии теплоотвода	154
6.3. Температурные поля алюминиевых дисков Корбино	159
6.3.1. Магнитодинамическая нелинейность при кризисе кипения	159

6.3.2. Тепловые напоры на поверхности и вольт-амперные характеристики	163
6.3.3. Градиентность магнитного поля и устойчивость упорядоченного температурно-электрического состояния	171
6.4. Заключительные замечания по результатам главы	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	179
ЛИТЕРАТУРА.....	183

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ