

Носков Михаил Дмитриевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ЛАПЛАСОВСКИХ
СТРУКТУР В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

01.04.02 – теоретическая физика
01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск — 2004

Работа выполнена в Научно исследовательском институте высоких напряжений при Томском политехническом университете и Северском государственном технологическом институте.

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор, Лопатин Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: чл.-кор. РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Вершинин Юрий Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Потекаев Александр Иванович

доктор физико-математических наук,
профессор Эпп Владимир Яковлевич

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Защита состоится “ 27 ” мая 2004 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 в Томском государственном университете по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан “ 20 ” апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

И.В. Ивонин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Установление законов формирования пространственных, временных и пространственно-временных структур в неравновесных условиях является одной из важных проблем современной физики. Систематическое изучение самоорганизации в неравновесных системах началось во второй половине прошлого века. Направление в науке, объединяющее данные исследования, сформировалось в 70-ые годы XX века и получило название «синергетика» (для обозначения данного раздела физики используются также такие названия, как нелинейная неравновесная термодинамика, теория самоорганизации). Основное внимание исследователей было сосредоточено на изучении формирования упорядоченных в пространстве и времени структур, связанных со стационарными или периодическими состояниями неравновесных систем (диссипативные структуры, автоколебания, волны переключений и др.). Менее изученными остаются явления неравновесного роста неупорядоченных структур в открытых системах под действием интенсивного внешнего воздействия.

Одним из наиболее интересных, с научной точки зрения, и важным для практических приложений видом неравновесного роста является формирование неупорядоченных структур под действием поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа. Примерами такого роста служат: формирование разрядных каналов при электрическом пробое твердых, жидких и газообразных диэлектриков; образование вязких пальцев при совместной фильтрации смешивающихся и несмешивающихся жидкостей с различными вязкостями; развитие колоний бактерий на поверхности питательной среды; образование дендритов твердой фазы при электроосаждении металлов из электролитов, агрегации частиц в газе, кристаллизации переохлажденных растворов и т.д. Несмотря на то, что рост определяется разными физическими процессами, формирование структур в различных системах имеет много общих черт, а форма структур подобна и, во многих случаях, фрактальна. Имеющееся сходство неслучайно и обусловлено общностью законов, описывающих формирование структур, и, в первую очередь, тем, что их рост связан с развитием неустойчивости границы структуры в поле, удовлетворяющем уравнению Лапласа (неустойчивость Муллинса-Секерки). В связи с этим представляется целесообразным выделить данный вид неупорядоченных нестационарных структур в отдельный класс и использование для его обозначения термина «лапласовские структуры».

Интенсивные исследования роста лапласовских структур начались в 80-е годы XX века. К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал по росту лапласовских структур в различных открытых системах, но его теоретическое обобщение с единой точки зрения до сих пор не было сделано. Вследствие неустойчивости, нелокальности и нелинейности процессов, приводящих к формированию структур, а также стохастичности и неравновесности их роста, применение аналитических методов ограничено изучением отдельных аспектов роста с помощью упрощенных моделей. Численные методы позволяют исследовать более сложные модели роста, рассматривать все стадии формирования структур при различных внешних условиях и параметрах среды.

Численные исследования формирования лапласовских структур проводятся как с помощью детерминистических, так и стохастических моделей. Детерминистические модели позволяют детально описывать физические процессы, однако не учитывают стохастичность роста лапласовских структур. Динамика формирования структур однозначно определяется распределением начальных и граничных условий. В реальных физических системах рост лапласовских структур связан с перманентным и стохастическим инициированием неустойчивостей в различных точках. Стохастическое инициирование неустойчивости описывается в рамках стохастических моделей роста. С помощью стохастических моделей удалось описать на качественном уровне многие наблюдаемые в экспериментах пространственно-временные особенности формирования лапласовских структур в открытых системах. Однако модели, основанные исключительно на стохастических принципах, являются формальными и могут применяться только к простым системам. Существенные упрощения, используемые в стохастических моделях, не позволяют использовать их для исследования роста лапласовских структур, когда существенную роль играют взаимосвязанные и нелинейные процессы переноса (энергии, вещества, заряда и т.д.) и взаимодействия различных физических полей.

Таким образом, является актуальным создание адекватного теоретического метода исследования закономерностей формирования лапласовских структур в сложных неравновесных системах, который свободен от недостатков детерминистических и стохастических методов и сочетает их достоинства.

Целью работы является создание общего теоретического подхода к изучению роста лапласовских структур, применение его для разработки математических моделей и установления закономерностей формирования структур в неравновесных системах.

На основании анализа современного состояния проблемы и в соответствии с целью работы были определены следующие **основные задачи исследований**:

- изучение условий, механизмов и особенностей формирования лапласовских структур в различных неравновесных системах;
- разработка самосогласованного стохастически-детерминистического подхода к построению моделей формирования лапласовских структур на основе анализа детерминистических и стохастических методов;
- создание физико-математических моделей роста лапласовских структур при различных видах пробоя твердых, жидких и газообразных диэлектриков, а также фильтрации жидкостей;
- разработка вычислительных алгоритмов и проблемно-ориентированного программного обеспечения, позволяющих исследовать рост лапласовских структур с помощью компьютерных экспериментов;
- количественное моделирование формирования лапласовских структур при импульсном пробое конденсированных диэлектриков, молниевом разряде, электрическом триинге, фильтрации смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в пористой среде;
- установление закономерностей роста лапласовских структур, изучение влияния внешних условий на их формирование, нахождение связей между физическими процессами и динамическими характеристиками роста структур.

Предметом исследования является рост лапласовских структур в неравновесных условиях. Общие и специфические закономерности формирования структур и методы построения математических моделей рассматривались на примерах развития электрического разряда в конденсированных диэлектриках, роста разрядных каналов молнии, электрического триинга, образования вязких пальцев при вытеснении смешивающихся и несмешивающихся жидкостей.

Методы исследования включают в себя анализ феноменологии и физических процессов, ответственных за рост лапласовских структур, построение теоретических моделей, создание комплекса вычислительных алгоритмов и проблемно-ориентированного программного обеспечения, проведение численных исследований роста структур в различных неравновесных системах, установление закономерностей формирования лапласовских структур на основе анализа результатов моделирования и сопоставления с экспериментальными данными.

Научная новизна работы:

- Разработан новый самосогласованный стохастически-детерминистический подход к построению моделей роста лапласовских структур в неравновесных условиях, сочетающий в себе достоинства стохастических и детерминистических методов.

- Созданы оригинальные физико-математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие количественно описывать формирование лапласовских структур при различных видах разряда в твердых, жидких и газообразных диэлектриках, фильтрации жидкостей в пористых средах.

- Установлены новые, а также интерпретированы известные ранее закономерности роста неупорядоченных структур при импульсном пробое конденсированных диэлектриков, молниевом разряде, электрическом триинге, вытеснении смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в пористой среде.

Автор защищает:

1. Обоснование выделения из многообразия пространственно-временных структур класса лапласовских структур, условия и механизмы их формирования.

2. Разработанные на основе стохастически-детерминистического подхода принципы построения теоретических моделей формирования лапласовских структур в неравновесных условиях.

3. Созданные самосогласованные физико-математические модели роста разрядных структур при импульсном пробое конденсированных диэлектриков, молниевом разряде, электрическом триинге.

4. Установленные пространственно-временные, полевые и токовые характеристики формирования лапласовских структур при импульсном пробое конденсированных диэлектриков, молниевом разряде и электрическом триинге в зависимости от распределения и величины напряженности поля, неоднородности среды, присутствия объемных зарядов.

5. Созданные физико-математические модели развития гидродинамических неустойчивостей одно- и двухфазной многокомпонентной неизотермической фильтрации в неоднородной пористой среде.

6. Установленные закономерности формирования лапласовских структур при вытеснении смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в зависимости от их свойств, параметров среды и характеристик тепло- и массообмена.

Научная ценность полученных результатов заключается в комплексности исследований формирования лапласовских структур в неравновесных условиях и разработке общего подхода к построению теоретических моделей роста таких структур. Установленные закономерности развития электрического разряда в жидких и твердых диэлектриках, молниевых разрядов, электрического триинга в полимерах, формирования вязких пальцев при одно- и двухфазной фильтрации способствуют более глубокому пониманию природы этих процессов и развивают соответствующие области физики.

Практическая значимость работы. Результаты исследований развития разряда в конденсированных диэлектриках могут быть использованы при разработке методов расчета электрической прочности высоковольтной изоляции; оптимизации работы электроразрядных установок, предназначенных для селективного разрушения композитных материалов, дробления горных пород и искусственных материалов; прогнозировании разрядных явлений в диэлектрических деталях аппаратов, подверженных воздействию пучков заряженных частиц.

Результаты исследований роста дендритов и частичных разрядов при электрическом триинге могут быть использованы при создании методов прогноза деградации полимерной изоляции, а также для диагностики её состояния по параметрам частичных разрядов.

Результаты исследований распространения нисходящего ступенчатого лидера молнии могут найти применение при создании методов расчета зоны защиты молниеотводов, оценки вероятности поражения наземных и воздушных объектов в зависимости от их геометрии и свойств подстилающей поверхности.

Результаты исследований развития гидродинамических неустойчивостей при одно- и двухфазной многокомпонентной неизотермической фильтрации имеют большое практическое значение для разработки методов прогнозирования распространения водных и органических растворов загрязняющих веществ в подземных водах; повышения эффективности заводнения нефтеносных пластов; оптимизации химико-технологических процессов, связанных с фильтрацией жидкостей через пористые среды.

Реализация работы. Результаты работы нашли применение при выполнении госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ в НИИ Высоких напряжений при Томском политехническом университете и в Северском государственном технологическом институте. Исследования поддерживались программами Минобразования, Миннауки, Минатома, «Университеты России», 4-мя грантами РФФИ, а также грантами НАТО, Американского физического общества, Немецкого исследовательского общества, фонда Фольксваген.

Созданные модели и результаты исследований непосредственно применялись при разработке комбинированной высоковольтной изоляции (АО Камкабель, г. Пермь); для проведения прогнозных расчетов распространения водных и органических растворов в пласте-коллекторе полигона глубинного захоронения радиоактивных отходов (ФГУП Сибирский химический комбинат, г. Северск).

На основе созданных моделей разработаны компьютерные лабораторные работы, которые используются в учебном процессе ТПУ, АлтГТУ, ИркАЖТ, СГТИ для изучения разрядных явлений.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием общепризнанных теоретических представлений и законов, достаточной обоснованностью сделанных допущений, применением апробированных и надежных вычислительных алгоритмов, верификацией проблемно-ориентированного программного обеспечения и подтверждается сопоставлением с данными экспериментальных исследований, а также, в отдельных случаях, с аналитическими расчетами и результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора. Результаты, изложенные в диссертации, получены автором и группой сотрудников, руководимой автором, а также - в сотрудничестве с научными работниками НИИ Высоких напряжений Томского политехнического университета, Северского государственного технологического института, Томского государственного университета, Университета г.Карлсруэ (Германия), Массачусетского технологического института (США). Личный вклад автора включает формулировку цели и задач исследований, разработку концептуальной основы нового подхода и физико-математических моделей, создание вычислительных алгоритмов и проблемно-ориентированных программ, анализ результатов исследований, обобщение представленного в диссертации материала, формулировку выводов и защищаемых положений.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XI, XII, XIII международных конференциях по проводимости и пробой жидких диэлектриков (Баден-Датвил, Швейцария, 1993г., Рим, Италия, 1996г., Нара, Япония, 1999г.); Международной конференции по физике диэлектриков (Санкт-Петербург, 1993, 2000); Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды» (г.Томск, 1995г.); IX и XI международных симпозиумах по высоковольтной технике (Грац, Австрия, 1995, Лондон, Великобритания, 1999г.); Международных конференциях по сопряженным задачам механики и экологии» (г.Томск, 1996, 1998, 2000, 2002 гг.); IV и VI Международных конференциях по современным проблемам электрогидродинамики и электрофизики жидких диэлектриков (Санкт-Петербург, 1996, 2000 гг.); X международной конференции по атмосферному электричеству (Осака, Япония, 1996г.); конференциях по электрической изоляции и диэлектрическим явлениям (Сан-Франциско, 1996, Остин, США, 1999, Виктория, Канада, 2000); XII международной конференции по газовым разрядам и их приложениям (Грифсвальд, Германия, 1997); Международной конференции «Всесибирские чтения по математике и механике» (г.Томск, 1997г.); VIII конференции ядерного общества России (Екатеринбург-Заречный, 1997г.); Всероссийской научной конференции «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение» (Челябинск, 1997г.); Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г.Томск, 1998г.); VI и VII международных конференциях по проводимости и пробой твердых диэлектриков (Вастерас, Швеция, 1998г., Эйндховен, Нидерланды, 2001г.); II, IV, и V Корейско-Российских симпозиумах по науке и технологиям (г.Томск, 1998, 2001гг., Ульсан,

Корея, 2000г.); III сибирском конгрессе по прикладной и индустриальной математике «INPRIM–98» (г.Новосибирск, 1998г.); V, VI и VII научно-технических конференциях Сибирского Химического Комбината (г.Северск, 1998, 2000, 2002 гг.); Всероссийской научной конференции «Байкальские чтения по математическому моделированию процессов в синергетических системах» (г.Улан–Удэ, 1999 г.); Международном научном семинаре «Хаос и структуры в нелинейных системах» (Караганда, 1999); Международных конференциях по математическим моделям и методам их исследования (г.Красноярск, 1999, 2001 гг.); II и III международных конференциях по проблемам управления и моделирования в сложных системах (Самара, 2000, 2001 гг.); XXV международной конференции по молниезащите (Родос, Греция, 2000 г.); IV Международной конференции по математическому моделированию (Москва, 2000 г.); IV Минском международном форуме “Тепло-массообмен ММФ–2000”, (Минск, 2000 г.); III Всероссийском семинаре по моделированию неравновесных систем (г.Красноярск, 2000 г.); Международной научной конференции по фундаментальным проблемам воды и водных ресурсов (Томск, 2000 г.); IX международной конференции по электрическим зарядам в непроводящих материалах (Тур, Франция, 2001 г.); Международной конференции по приложениям электроимпульсной технологии (Гельзенкирхен, Германия, 2001г.); Всероссийской научной школы «Математические методы в экологии» (Петрозаводск, 2001 г.); Всероссийской научной конференции «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий» (г.Улан–Удэ, 2002 г.); VIII Международной конференции по оптимизации электрического и электронного оборудования (Брашов, Румыния, 2002 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликованы: 39 статей в периодических изданиях, 51 статья в сборниках, 65 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка используемой литературы из 445 наименований. Работа изложена на 309 страницах и содержит 137 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, охарактеризованы научные новизна, ценность и практическая значимость работы, приведены основные защищаемые положения, представлена структура диссертации и изложено кратко её содержание.

В первой главе диссертации дано обоснование выделения из многообразия пространственно-временных структур класса лапласовских структур, определены их характерные особенности, условия и механизмы роста.

Лапласовские структуры образуются при различных явлениях: электрическом разряде в твердых, жидких и газообразных диэлектриках, фильтрации смешивающихся и несмешивающихся жидкостей с различными вязкостями, электроосаждении металлов из электролитов, агрегации частиц из газа, росте колоний бактерий, кристаллизации переохлажденных растворов и т.д. Формирование лапласовских структур происходит в неравновесных условиях, сопровождается об-

меном веществом и энергией с окружающей средой (открытость системы) и характеризуется согласованным протеканием различных нелинейно связанных процессов (сложность и кооперативность системы). Отличительными особенностями формирования лапласовских структур являются стохастичность роста и отсутствие стационарного состояния системы, как это имеет место при образовании упорядоченных диссипативных структур. Рост структуры прекращается не в результате достижения стационарного состояния, а вследствие пространственно-временных ограничений, накладываемых внешними условиями. Все это позволяет рассматривать формирование лапласовских структур как процесс динамической стохастической самоорганизации.

В разных системах физическая природа поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа и управляющего ростом, может быть различна (электрическое поле при разряде в диэлектриках, гидростатическое давление при фильтрации, концентрация частиц при электроосаждении и агрегации и др.). Несмотря на различие процессов, формирование лапласовских структур в различных системах имеет общие черты. Это обусловлено общностью законов их формирования. Основным механизмом, определяющим динамику роста лапласовских структур, является развитие неустойчивости движения границы структуры под действием поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа. Эта неустойчивость называется неустойчивостью Муллинса-Секерки (в гидродинамике - неустойчивость Тейлора или Сэффмана-Тейлора).

Простейшим примером развития неустойчивости является движение эквипотенциального фронта со скоростью, пропорциональной градиенту поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа в области перед фронтом. В этом случае прямая линия фронта является неустойчивой: образование выступа фронта приводит к росту градиента поля, а это ведет к ускорению роста выступа. В реальных системах развитие неустойчивости происходит более сложным образом. Как правило, имеется несколько взаимосвязанных полей ψ и процессов переноса (вещества, энергии, заряда и др.), определяемых потоками J . Управляющее ростом структуры поле Φ удовлетворяет уравнению вида:

$$\nabla(k(\psi)\nabla\Phi) = \rho(\psi), \quad (1)$$

где $k(\psi)$ - функция «проницаемости» среды, $\rho(\psi)$ - функция источника поля. Развитие неустойчивости определяется положительной обратной связью градиента поля $\nabla\Phi$ и некоторых потоков J . Кроме этого, возможно отсутствие межфазной границы - форма структуры определяется распределением некоторого поля ψ (концентрации, температуры и др.). Инициирование неустойчивости происходит спонтанно и перманентно вследствие микронеоднородностей среды и флуктуаций параметров системы.

Форма лапласовских структур характеризуется случайным ветвлением и отсутствием самопересечений. Когда влияние факторов, подавляющих развитие неустойчивости, незначительно, лапласовские структуры являются фракталами - самоподобными объектами с дробной размерностью D . Если скорость роста пропорциональна градиенту поля, и граница структуры эквипотенциальна, фрактальная размерность D зависит от размерности вмещающего пространства ($D \approx 1.7$ и

2.5 в двух- и трехмерном пространстве соответственно). Фрактальность лапласовских структур является результатом перманентного инициирования неустойчивостей и подавления роста отстающих ветвей доминирующими ветвями вследствие эффекта экранировки поля.

Таким образом, рост лапласовских структур в открытых неравновесных системах характеризуется общими закономерностями и может быть исследован в рамках единого теоретического подхода.

Во второй главе рассматриваются различные теоретические методы исследования формирования лапласовских структур и предлагается общий стохастически-детерминистический подход к построению моделей роста таких структур в неравновесных условиях.

Наиболее эффективным теоретическим методом исследования формирования лапласовских структур является построение дискретных моделей роста и исследование их численными методами. Вследствие стохастичности, нестационарности и неустойчивости роста, нелокальности и нелинейности процессов, приводящих к формированию лапласовских структур, применение аналитических методов ограничено изучением отдельных аспектов роста с помощью упрощенных моделей. Численные методы дают возможность исследовать более сложные модели роста, рассматривать все стадии формирования структур при различных внешних условиях и параметрах среды.

Для исследования роста лапласовских структур применяются как детерминистические, так и стохастические модели. Достоинством детерминистических моделей является детальное описание физических процессов в сложных системах. Однако они имеют существенный недостаток, заключающийся в необходимости искусственного инициирования неустойчивости с помощью возмущения начальных или граничных условий. При этом форма образующейся структуры однозначно определяется видом возмущения. В реальных физических системах формирование лапласовских структур связано с перманентным стохастическим инициированием неустойчивостей в различных точках. Стохастические модели описывают основные особенности формы лапласовских структур, такие как случайные изгибы и ветвление. Однако стохастические модели являются формальными и могут применяться только при изучении достаточно простых систем.

Для построения теоретических моделей роста лапласовских структур в сложных системах, когда существенную роль играют взаимосвязанные и нелинейные процессы переноса (энергии, вещества, заряда и т.д.) и взаимодействия различных физических полей, разработан стохастически-детерминистический подход, сочетающий в себе достоинства стохастического и детерминистического методов. В рамках этого подхода детерминистические методы применяются для описания динамики потоков и полей макроскопических величин, когда имеет место усреднение флуктуаций и микронеоднородностей среды. Стохастические методы используются для описания на макроскопическом уровне результата неустойчивого нарастания микровозмущений, вызванных флуктуациями и микронеоднородностью среды.

Предложенный метод построения стохастически-детерминистических моделей формирования лапласовских структур заключается в следующем. Прово-

дится анализ характеристик роста и определяются основные физические процессы, происходящие в системе. Процессы, реализующие положительную обратную связь (ответственные за развитие неустойчивости) и определяющие рост структуры, описываются стохастически с помощью вероятностных соотношений. Вид и параметры вероятностного закона роста структуры определяются путем анализа процессов, приводящих к развитию неустойчивости, или на основе сравнения результатов экспериментов и моделирования (феноменологический метод). Процессы, не участвующие в неустойчивости, описываются детерминистически. Стохастические и детерминистические соотношения объединяются в единую самосогласованную модель.

На основе предложенного подхода были созданы оригинальные математические модели роста лапласовских структур при разряде в конденсированных диэлектриках, молниевом разряде, электрическом триинге, одно- и двухфазной фильтрации.

Третья глава посвящена исследованию формирования лапласовских структур при электрическом разряде в конденсированных диэлектриках.

Приведено созданное на основе экспериментальных данных феноменологическое описание развития разряда, проведен анализ математических моделей формирования разрядных структур, рассмотрены физические процессы и различные виды неустойчивостей (тепловая, электромеханическая, ионизационная, перегревная) состояния диэлектрика в электрическом поле.

На основе стохастически-детерминистического подхода создана модель развития разряда в конденсированных диэлектриках. Модель описывает рост проводящих каналов, движение электрических зарядов, изменение проводимости каналов и динамику электрического поля, как взаимосвязанные и согласованные процессы. Рост разрядных каналов является следствием перехода диэлектрика в проводящее состояние в результате развития одной или нескольких неустойчивостей под действием сильного электрического поля. Основным допущением модели является предположение, что ответственные за развитие неустойчивостей процессы (инжекция заряда, ионизация, нагрев, механическая деформация, изменение агрегатного состояния и т.д.) определяются локальной напряженностью электрического поля. Интегральный эффект различных процессов, приводящих к образованию разрядного канала, описывается стохастическим законом. Плотность вероятности ω_n роста структуры в некотором направлении $\vec{n}$ принимается пропорциональной квадрату проекции E_n напряженности поля на данное направление, если проекция напряженности превосходит критическое значение E_c :

$$\omega_n = \alpha \cdot \theta(E_n - E_c) \cdot E_n^2, \quad (2)$$

где α - коэффициент скорости роста, $\theta(x)$ - ступенчатая функция ($\theta(x)=1$ при $x>0$ и $\theta(x)=0$ при $x\leq 0$). Соотношение (2) отражает пороговый характер развития неустойчивости и роль энергии поля при образовании проводящего канала.

Движение электрических зарядов и перераспределение электрического поля описываются детерминистически. Электрическое поле создается зарядами, расположенными вдоль каналов разрядной структуры, на поверхности электродов и в объеме диэлектрика. В зависимости от метода дискретизации при расчетах элек-

трического поля используется принцип суперпозиции полей или теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике:

$$\nabla(\varepsilon\varepsilon_0\vec{E}) = \rho, \quad (3)$$

где ε и ε_0 - относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости, ρ - плотность зарядов. Здесь и далее в работе используется Международная система единиц (СИ).

Движение зарядов по разрядным каналам и в диэлектрике во время развития разряда определяется законами Ома и сохранения заряда. Изменение объемной плотности заряда ρ_V в диэлектрике с удельной проводимостью σ описывается уравнением непрерывности:

$$\frac{d\rho_V}{dt} = -\nabla(\sigma \cdot \vec{E}). \quad (4)$$

Динамика линейной плотности заряда ρ_L вдоль каналов находится из уравнения:

$$\frac{d\rho_L}{dt} = -\frac{d}{dl}(\gamma \cdot E_l), \quad (5)$$

где γ - погонная проводимость канала, l координата вдоль канала. В точках ветвления выполняется условие равенства нулю алгебраической суммы токов.

Проводимость разрядных каналов изменяется в результате расширения каналов, нагрева, ионизации, электрон-ионной рекомбинации, прилипания электронов к стенкам каналов и молекулам газа и т.д. Эти процессы зависят от выделения энергии при прохождении по каналам электрического тока и рассеяния энергии в окружающее пространство. Для расчета изменения проводимости применяется модифицированная формула Ромпе-Вейцеля для проводимости искрового канала:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \chi \cdot \gamma \cdot E_l^2 - \xi \cdot \gamma, \quad (6)$$

где χ и ξ - параметры возрастания и убывания проводимости, соответственно. Первое слагаемое в правой части уравнения (6) связывает рост проводимости с мощностью джоулева энерговыделения в разрядном канале, а второе описывает экспоненциальное уменьшение проводимости каналов в результате рассеяния энергии. Проводимость вновь образовавшегося канала принимается равной γ_0 .

На основе предложенной модели созданы различные двух- и трехмерные решеточные и нерешеточные численные алгоритмы и разработаны компьютерные программы, с помощью которых были определены закономерности, связывающие пространственно-временные и токовые характеристики роста разрядных структур с величиной напряжения, неоднородностью проводимости и проницаемости, а также распределением объемного заряда в диэлектрике.

Результат моделирования роста анодной разрядной структуры в жидком диэлектрике показан на рис. 1. Повышение напряжения приводит к росту фрактальной размерности разрядных структур, увеличению скорости роста каналов и силы разрядного тока (рис. 2). Скорость роста структуры падает при удалении от острия, достигает минимума вблизи середины межэлектродного промежутка и увеличивается при приближении к плоскому электроду. Сила тока и величина заряда структуры увеличиваются в процессе роста. Развитие токовой неустойчивости в

каналах при повышении напряжения может привести к трансформации кустообразной структуры в древовидную.

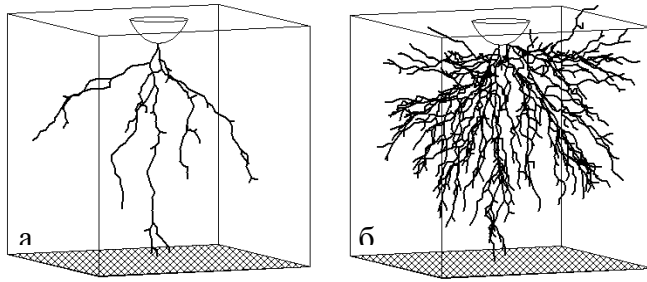


Рис. 1. Разрядные структуры, полученные при различных значениях напряжения U : (а) $U=10$ кВ, $D=1.38$, $t=4.6$ мкс; (б) $U=20$ кВ, $D=2.43$, $t=1.6$ мкс.

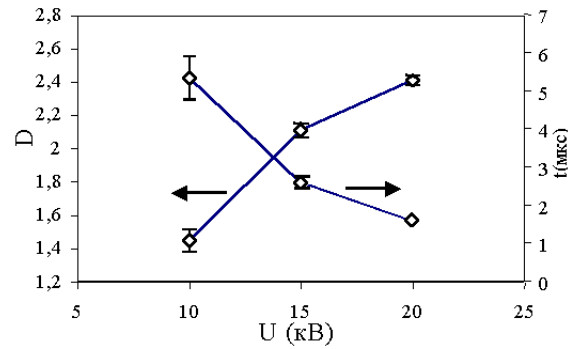


Рис. 2. Зависимости фрактальной размерности D и времени пробоя t от напряжения.

Неоднородность пространственного распределения диэлектрической проницаемости, проводимости диэлектрика, а также присутствие в нем заряженных областей (объемных зарядов) оказывают заметное влияние на развитие разряда. Разрядная структура отталкивается от заряженной области в случае совпадения её полярности с полярностью внедренного заряда и притягивается к ней - в противоположном случае. Расположенное между электродами сферическое включение с повышенной проницаемостью притягивает растущую структуру, а с пониженной проницаемостью отталкивает. Барьеры с повышенной проницаемостью, расположенные перпендикулярно оси межэлектродного промежутка, приводят к искривлению и удержанию разрядной структуры в барьерном слое (рис.3).

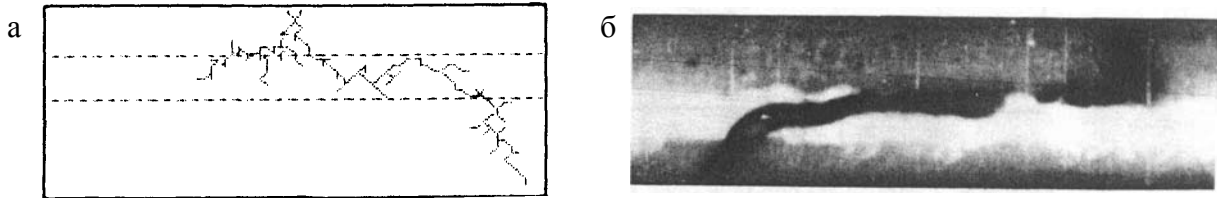


Рис. 3. Удержание разрядной структуры в барьерном слое: а – моделирование, $\varepsilon_0/\varepsilon=15$; б - эксперимент (след канала пробоя), $\varepsilon_0/\varepsilon=4.3$, толщина диэлектрика $1.1 \cdot 10^{-3}$ м.

Влияние включений с повышенной проводимостью на развитие разряда зависит от соотношений между временем формирования разрядной структуры τ_s , максвелловским временем релаксации заряда во включении τ_{in} (определяется проводимостью включения) и временем релаксации заряда в каналах τ_{ch} (определяется погонной проводимостью). Включение практически не оказывает влияния на развитие разряда, если $\tau_{in} > \tau_s$. В противном случае ($\tau_{in} < \tau_s$), включение с повышенной проводимостью притягивает разрядную структуру (рис.4). Когда погонная проводимость невысока ($\tau_{ch} > \tau_s$), рост каналов, достигших включения, прекращается,

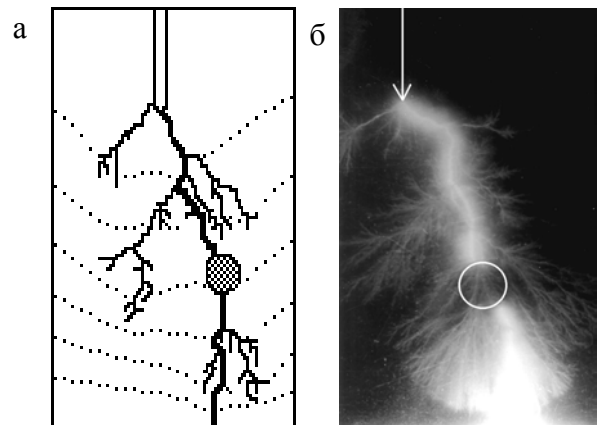


Рис. 4. Разряд в диэлектрике с проводящим включением: а -моделирование; б -эксперимент.

и происходит обход барьера растущей структурой. Если проводимость разрядных каналов высока ($\tau_{ch} < \tau_s$), а включение имеет очень высокую проводимость ($\tau_{in} \ll \tau_{ch}$), то после касания включения возможно инициирование роста структуры с противоположной стороны включения.

Пространственно-временные и токовые характеристики развития разряда в заряженном диэлектрике определяются величиной и пространственным распределением объемного заряда. В случае высокой плотности заряда и малых размеров заряженной области, разрядная структура полностью заполняет область с внедренным зарядом (рис. 5). Уменьшение плотности заряда приводит к линейному уменьшению размеров структуры (рис. 6). Скорость роста каналов, их проводимость

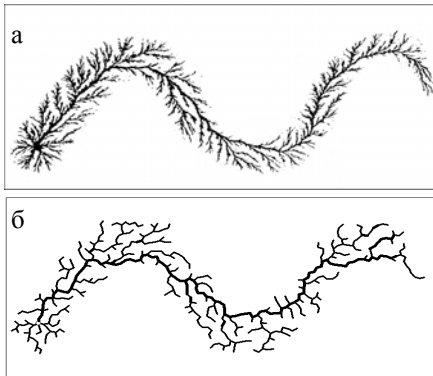


Рис. 5. Формирование разрядной структуры вдоль заряженной полосы: а - эксперимент, б - моделирование (размер образца 80×160 мм, $\rho = 0.8$ мкКл/см²).

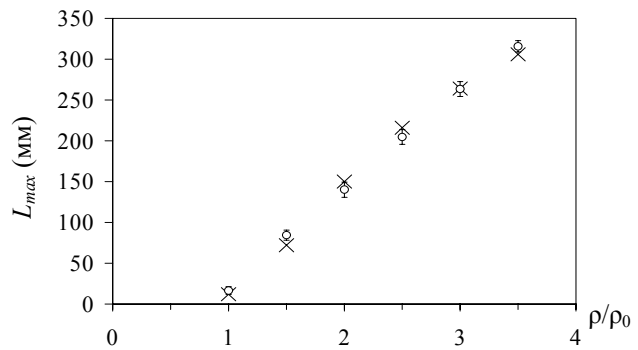


Рис. 6. Зависимость длины разрядной структуры L_{max} от относительной плотности объемного заряда: x-эксперимент, o-моделирование.

мощность и сила разрядного тока увеличиваются при повышении плотности заряда. При разряде в равномерно заряженном диэлектрике сила тока после достижения максимума равномерно убывает (рис. 7,а). В случае неравномерного распределения заряда сила тока увеличивается при прохождении структуры через области с большей плотностью заряда (рис. 7,б).

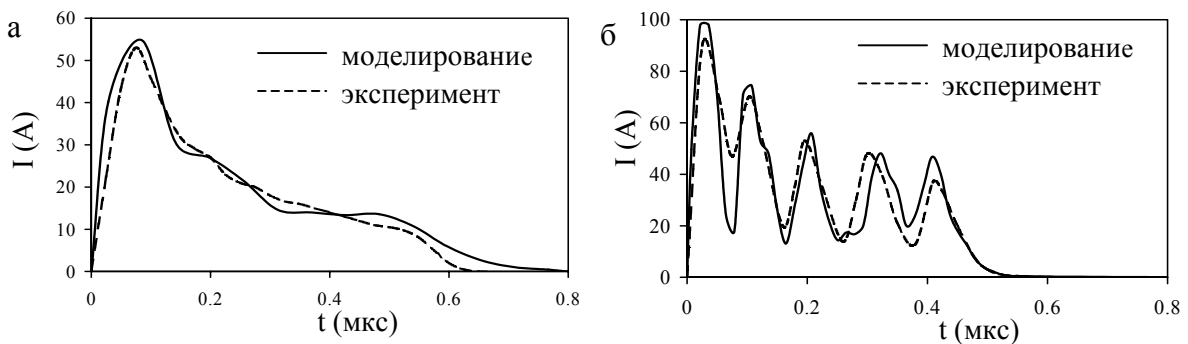


Рис. 7. Зависимость разрядного тока I от времени t : а - однородно заряженный образец; б - образец, в котором пять заряженных полос разделены незаряженными промежутками.

Полученные пространственно-временные и токовые характеристики развития разряда объясняются самосогласованным перераспределением электрического поля в диэлектрике, ростом структуры, выделением энергии электрического поля и изменением проводимости разрядных каналов, а также появлением связанных и свободных электрических зарядов в диэлектрике.

Четвертая глава посвящена исследованию формирования лапласовских структур при молниевом разряде.

Рассмотрено строение грозового облака, дано феноменологическое описание развития молнии, проанализированы математические модели распространения нисходящего отрицательного ступенчатого лидера молнии.

Предложена самосогласованная стохастически-детерминистическая модель формирования структуры разрядных каналов молнии. Модель описывает рост внутриоблачных каналов, распространение нисходящего ступенчатого лидера между облаком и землёй, движение электрических зарядов в верхнем слое земной поверхности и по разрядным каналам, изменение их проводимости, перераспределение электрического поля.

Рост структуры молнии происходит в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости в стримерной зоне лидера и трансформации наиболее развитых стримеров в высокопроводящий плазменный канал (ступень лидера). В настоящей модели интегральный эффект различных процессов, протекающих в стримерной зоне, описывается стохастически, с помощью зависимости вероятности формирования ступени лидера от напряженности поля, аналогичной соотношению (2). Изменение электрического поля, а также перераспределение электрических зарядов в верхнем слое земной поверхности и вдоль разрядной структуры описываются детерминистически с помощью теоремы Гаусса (3) и уравнений непрерывности (4), (5), соответственно. Изменение проводимости каналов описывается с помощью дифференциального аналога формулы Ромпе-Вейцеля для проводимости длинной искры (выражение (6) при $\xi=0$). Область моделирования включает нижнюю отрицательно заряженную часть облака, подстилающую земную поверхность и пространство между ними.

С помощью численной реализации модели были определены пространственно-временные и токовые характеристики распространения нисходящего ступенчатого лидера молнии с учетом рельефа и проводимости земной поверхности.

Результат моделирования развития молнии показан на рис. 8. На первой стадии образуются внутриоблачные каналы. В электрическом поле, создаваемом зарядами облака и земли, происходит поляризация структуры. Отрицательно заряженные каналы выходят из облака и распространяются к земле в виде нисходящего ступенчатого лидера. Перераспределение зарядов ведет к усилению поля перед лидером и ослаблению поля в его каналах. Приближение лидера к земле приводит к усилению напряженности поля вблизи поверхности и инициированию встречного разряда с земли. Распределения электрических характеристик вдоль основного канала доминирующей ветви показаны на рис 9.

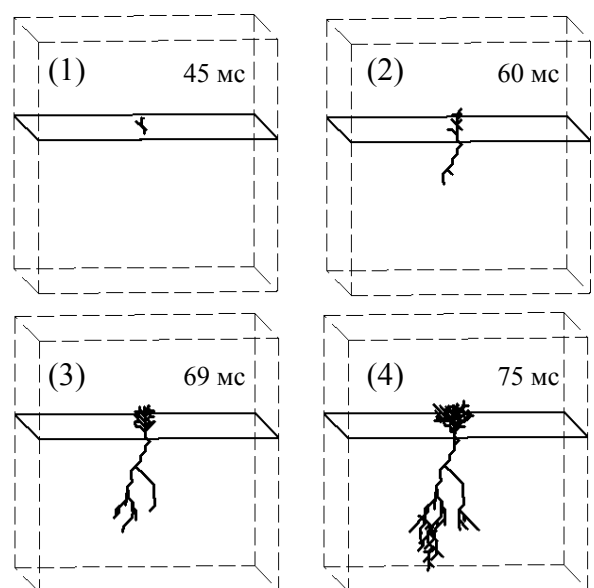


Рис.8. Формирование структуры разрядных каналов молнии.

Увеличение заряда облака приводит к росту скорости лидера, повышению тока, текущего по каналам, и усилению ветвления каналов.

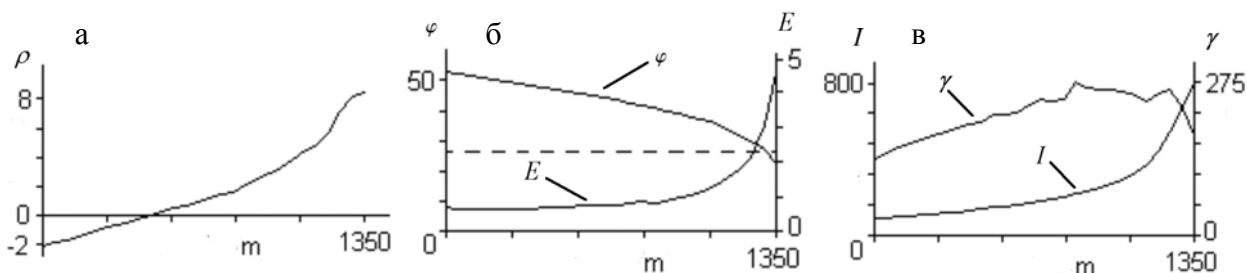


Рис. 9. Распределения: (а) плотности заряда ρ , (б) потенциала φ и напряженности поля E , (в) силы тока I и проводимости канала γ . Пунктир – величина E до инициирования молнии.

Распределение точек удара молнии по плоской поверхности близко к нормальному. Наклон земной поверхности вызывает сдвиг распределения точек удара в сторону возвышения. Перераспределение электрического поля над земной поверхностью, создаваемое возвышенностями и впадинами рельефа, приводит к ориентации нисходящего лидера на возвышение (рис. 10). Вероятность удара молнии в заземлённое сооружение увеличивается с его высотой и приближением сооружения к точке инициирования молнии. Проводимость верхнего слоя земной поверхности влияет на распространение нисходящего ступенчатого лидера через изменение распределения электрического поля между его головкой и поверхностью. Понижение величины удельной проводимости верхнего слоя земной поверхности приводит к уменьшению вероятности удара молнии в заземлённое сооружение (рис.11). В случае контакта высоко- и низкопроводящего слоя земной поверхности образуется зона притяжения молнии на границе высокопроводящей части поверхностного слоя.

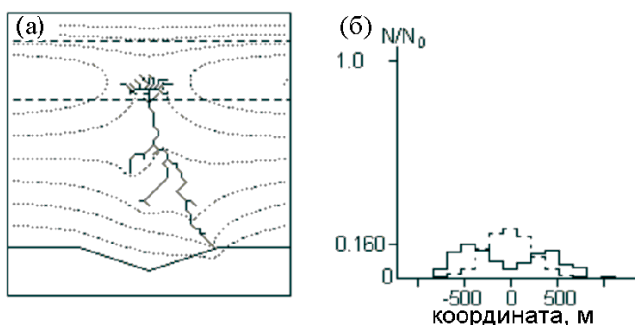


Рис. 10. Влияние впадины земной поверхности на распространение нисходящего лидера (а) и распределения точек удара молнии (б). Пунктиром показано распределение точек удара для плоской поверхности. $N_0=300$.

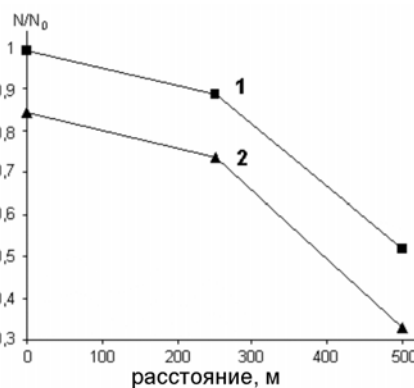


Рис. 11. Зависимости вероятности удара в сооружение от расстояния между ним и координатой точки инициирования молнии. 1- высоко-, 2- низкопроводящая поверхность. $N_0=300$.

Пятая глава посвящена формированию лапласовских структур в процессе электрического триинга при длительном воздействии переменного напряжения.

Приведены экспериментальные характеристики роста дендритов (ветвящихся структур, состоящих из наполненных газом каналов) и частичных разрядов при электрическом триинге, рассмотрены физические процессы, определяющие образование каналов и развитие в них частичных разрядов, проанализированы модели частичных разрядов и роста дендритов.

Предложена стохастически-детерминистическая модель электрического триинга. Модель описывает рост структуры каналов, зажигание и гашение частичных разрядов, перенос зарядов по разрядной структуре в процессе частичных разрядов, повреждение диэлектрика частичными разрядами, а также перераспределение электрического поля, как взаимосвязанные и согласованные процессы. Образование наполненных газом каналов происходит в результате разрушения диэлектрика под действием бомбардировки электронами и ионами, ультрафиолетового излучения, химически активных соединений, повышенного давления и температуры и других эффектов частичных разрядов, происходящих в уже существующих каналах. Разрушение диэлектрика является неустойчивым процессом, зависящим от выделяющейся при частичных разрядах энергии и локального электрического поля. В настоящей модели интегральный эффект различных процессов, приводящих к образованию каналов, описывается стохастически. Рост структуры происходит, если величина локального разрушения H (т.е. энергия, выделившаяся на единицу длины канала) достигает критического значения H_c , и напряженность электрического поля в данном месте превышает критическое значение E_c . Направление роста нового канала стохастически зависит от локальной напряженности поля: вероятность роста W_n в направлении $\vec{n}$ пропорциональна квадрату проекции E_n локальной напряженности на это направление, если E_n больше E_c , и равна нулю в противном случае:

$$W_n = Z^{-1} \cdot \theta(E_n - E_c) \cdot \theta(H - H_c) E_n^2, \quad (7)$$

где Z - нормировочный множитель.

Потенциал электрического поля φ рассчитывается с помощью зарядового метода, основанного на законе Кулона и принципе суперпозиции полей:

$$\varphi = \int_L \frac{\rho_L dl}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} + \iint_S \frac{\rho_s dS}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (8)$$

где ρ_s - поверхностная плотность заряда на электродах, r - расстояние, L - структура каналов, S - поверхность электродов.

Зажигание и гашение частичных разрядов определяется пороговыми зависимостями от локальной напряженности электрического поля. Инициирование частичного разряда происходит, когда проекция напряженности электрического поля на направление канала в некоторой точке структуры превышает пороговую напряженность зажигания E_{ign} . Разряд прекращается, когда проекция напряженности поля становится ниже напряженности гашения E_{res} или проводимость канала падает до нуля. Изменение распределения заряда по разрядной структуре в процессе развития частичного разряда определяется распределением электрического поля, погонной проводимостью и геометрией разрядных каналов, согласно уравнению (5). Изменение погонной проводимости γ определяется модифицированной формулой Ромпе-Вейцеля (6). Энергия H локального разрушения увеличивается в процессе частичного разряда пропорционально выделяющейся в каналах энергии:

$$dH/dt = \gamma \cdot E_l^2. \quad (9)$$

В случае роста нового элемента структуры, энергия локального разрушения H уменьшается на величину H_c .

С помощью численной реализации модели были определены пространственно-временные и зарядовые характеристики формирования лапласовских структур в процессе электрического триинга.

Результаты моделирования роста дендритов и траектории частичных разрядов показаны на рис. 12. Фрактальная размерность и скорость роста структуры увеличиваются с повышением напряжения (рис.13).

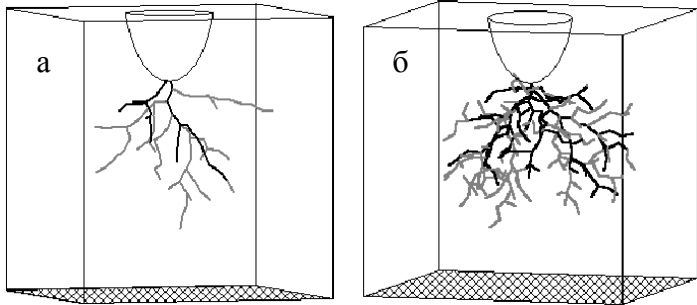


Рис. 12. Разрядные структуры (серые линии) и траектории частичных разрядов (жирные линии) а- напряжение $U=6$ кВ, величина частичного разряда $q=157.4$ пКл; б - $U=12$ кВ, $q=624.3$ пКл.

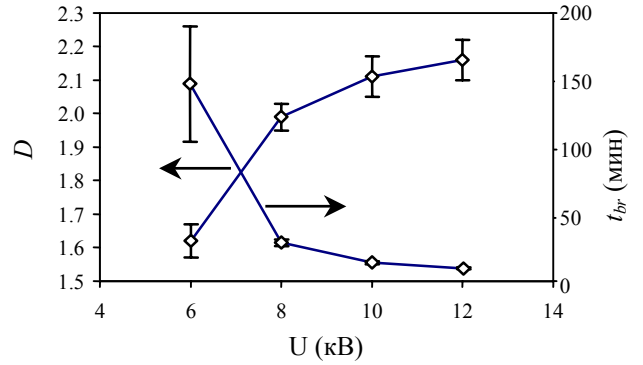


Рис.13. Зависимости фрактальной размерности D (а) и времени роста t_{br} (б) от напряжения U .

На начальном этапе рост дендритов замедляется со временем. Когда каналы пересекают половину межэлектродного промежутка, происходит ускорение роста. Увеличение размеров дендритов L и суммарной длины S всех каналов на первой стадии роста описывается степенными функциями времени:

$$L \propto t^{\alpha_L}, S \propto t^{\alpha_S}. \quad (10)$$

Величины показателей α_L и α_S увеличиваются с повышением напряжения, табл.1. Отношение показателей близко к фрактальной размерности структуры $D \approx \alpha_S / \alpha_L$.

Таблица 1. Величины показателей α_S , α_L и фрактальных размерностей D .

U, кВ	α_S	α_L	α_S / α_L	D
6	0.68	0.40	1.70	1.67
8	1.11	0.55	2.02	1.99
10	1.34	0.62	2.16	2.15
12	1.48	0.66	2.24	2.19

Различные частичные разряды происходят в разных частях структуры. Величина разряда увеличивается с длиной его траектории (суммарной длиной каналов, принявших участие в данном разряде). При частичном разряде волны заряда и электрического поля распространяются вдоль разрядных каналов. Временные зависимости длины траектории разряда S_{pd} и разрядного тока I приведены на рис.14.

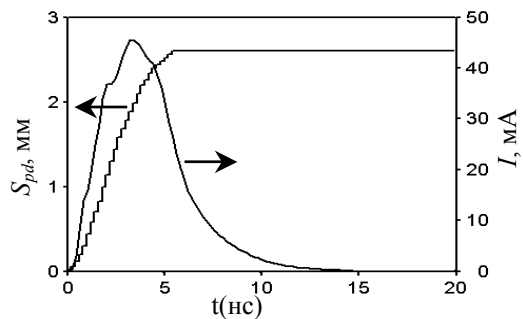


Рис.14. Зависимости длины траектории S_{pd} и силы тока I от времени при частичном разряде.

Суммарный заряд за период, средняя и максимальная величины частичных разрядов увеличиваются по мере роста дендритов. При одинаковой длине структуры увеличение прикладываемого напряжения ведет к росту частоты следования и величины частичных разрядов (рис.15).

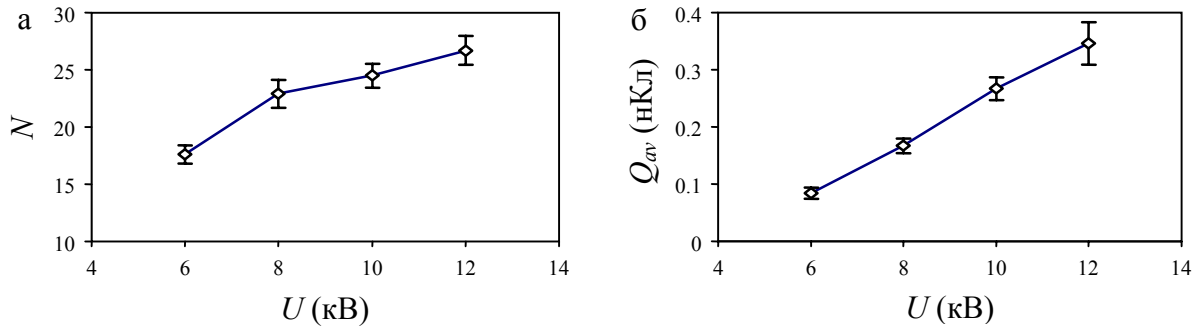


Рис. 15. Зависимости средних значений (а) количества частичных разрядов N и (б) средней величины разрядов Q_{av} за период от величины приложенного напряжения.

Частота следования частичных разрядов повышается с ростом скорости изменения напряжения. В случае, когда длина траектории разряда ограничена размерами разрядной структуры, величина разряда не зависит от мгновенной величины прикладываемого напряжения. В противоположном случае максимальная длина траектории и величина разряда увеличиваются с ростом мгновенного значения напряжения. Это приводит к формированию характерных для электрического триинга крыловидных фазовых диаграмм частичных разрядов (рис.16). Частота частичных разрядов уменьшается с ростом их величины.

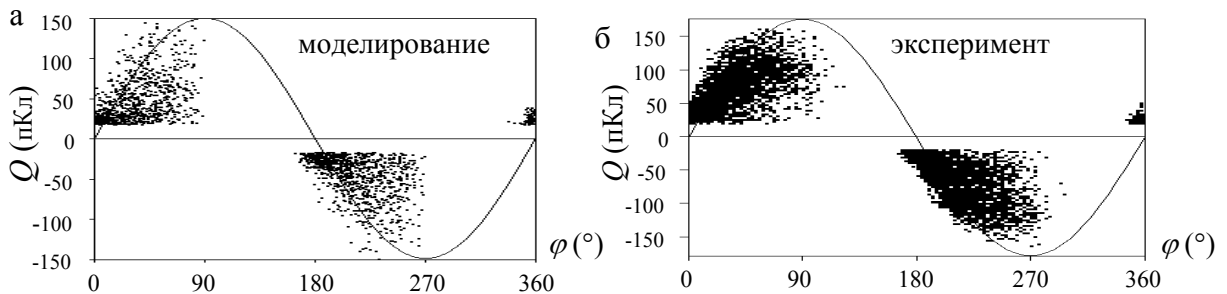


Рис. 16. Корреляции фазы и величины частичных разрядов (φ - q - n диаграммы).

Концепция самоорганизованной критичности, предложенная П. Баком, Ч. Тангом и К. Визенфельдом (Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Phys. Rev. Lett., 1987, Vol.59, P.381), была обобщена и использована для изучения динамики частичных разрядов в процессе электрического триинга. Распределенные по структуре электрические заряды рассмотрены как диссипативная система с большим числом степеней свободы. Рассеяние энергии электрического поля происходит в результате развития частичных разрядов. Концептуальная дискретная динамическая модель самоорганизованной критичности (модель «песочной кучи») была модифицирована введением периодического внешнего воздействия. С помощью модифицированной модели «песочной кучи» удалось качественно описать динамику частичных разрядов. Было показано, что под воздействием переменного напряжения система распределенных по разрядной структуре зарядов периодически переходит в критическое состояние. Размеры области критического состояния, где про-

исходят частичные разряды различной величины, увеличиваются с ростом значения приложенного напряжения, рис.17. На основе предположения о наличии динамической самоорганизованной критичности было дано объяснение экспериментальным данным и результатам моделирования частичных разрядов.

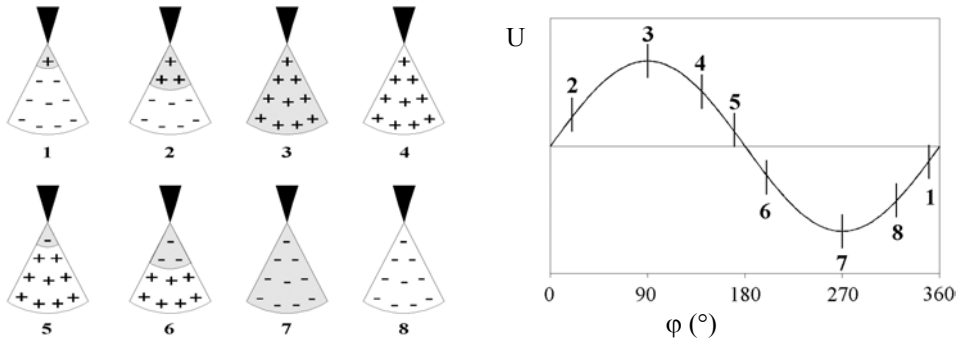


Рис. 17. Эволюция области, находящейся в критическом состоянии, (показана серым цветом) и перераспределение электрического заряда по структуре каналов (обозначена большим сектором). Соответствующие фазовые углы отмечены на синусоиде.

Шестая глава посвящена исследованию формирования лапласовских структур (вязких пальцев) при вытеснении жидкости с большей вязкостью смешивающейся с ней жидкостью, имеющей меньшую вязкость, в пористой среде под действием градиента давления.

Приведено феноменологическое описание роста вязких пальцев, рассмотрены основные процессы, происходящие при однофазной неизотермической фильтрации, проведен анализ математических моделей роста вязких пальцев при вытеснении смешивающихся жидкостей.

Созданная на основе стохастически-детерминистического подхода модель однофазной неизотермической фильтрации описывает конвективный тепло- и массоперенос, гидродинамическую дисперсию, теплопроводность и перераспределение давления как взаимосвязанные и согласованные процессы. Формирование вязких пальцев является результатом развития гидродинамической неустойчивости Сэффмана-Тейлора. Развитие неустойчивости определяется положительной обратной связью между потоком жидкости с меньшей вязкостью в вязких пальцах и градиентом давления перед ними. В созданной модели конвективный тепло- и массоперенос описываются стохастически с помощью метода блуждающих лент тока. Предложенный метод является стохастическим обобщением классического метода лент тока, применяемого в теории фильтрации для фрагментации потока по линиям тока. Блуждающие ленты тока начинаются на контуре нагнетания, заканчиваются на контуре стока и имеют постоянную площадь сечения. Их статистически усредненное положение соответствует классической ленте тока. Вероятность W_n движения блуждающей ленты тока в некотором направлении $\vec{n}$ принимается пропорциональной проекции градиента давления ∇P_n на это направление:

$$W_n = -Z^{-1} \cdot \theta \left(-\frac{k}{\mu(T, C)} \nabla P_n \right) \cdot \frac{k}{\mu(T, C)} \nabla P_n, \quad (11)$$

где Z - нормировочный коэффициент; k - проницаемость среды; μ - вязкость жидкости, зависящая от температуры T и концентрации C , растворенного в жидкости

загущающего компонента. Метод блуждающих лент тока можно рассматривать как стохастическую интерпретацию закона Дарси для течения вязкой жидкости в пористой среде. На каждом временном шаге строится одна лента тока, вдоль которой происходит фильтрация флюида объемом $\Delta V = Q \cdot \Delta t$ (Q - величина расхода жидкости, Δt – временной интервал). Конвективные тепло- и массоперенос вдоль ленты тока определяются соответствующими потоками J_T и J_c :

$$J_T = c_l \cdot T \cdot Q, \quad J_c = C \cdot Q, \quad (12)$$

где c_l - теплоемкость жидкости.

Изменение давления в среде, гидродинамическая дисперсия и теплопроводность описываются детерминистически. Распределение давления P в среде рассчитывается из условия непрерывности потока в приближении жесткого режима фильтрации с учетом зависимости вязкости μ от температуры T и концентрации C загущающего компонента в жидкости:

$$\nabla \left(\frac{k}{\mu(T, C)} \cdot \nabla P \right) = 0. \quad (13)$$

Гидродисперсия описывается в рамках приближения двойной пористости с помощью массопотока растворенного компонента между проточными и застойными порами. Плотность массопотока пропорциональна разности концентраций компонента в подвижной C и неподвижной C^* частях жидкости:

$$J_D = \alpha_D (C - C^*), \quad (14)$$

где α_D - коэффициент скорости массообмена. Плотность потока энергии $\vec{J}_F$ в результате теплопроводности определяется законом Фика:

$$\vec{J}_F = -\beta \cdot \nabla T, \quad (15)$$

где β – эффективный коэффициент теплопроводности среды.

С помощью численной реализации модели были определены закономерности формирования лапласовских структур при неизотермической фильтрации в однородной и неоднородной по проницаемости пористой среде.

Пример роста вязких пальцев при вытеснении жидкостью с меньшей вязкостью (вода) жидкости с большей вязкостью (водный раствор загущающего вещества - глицерола) приведен на рис. 18. На начальном этапе формируется несколько тонких языков вытесняющей жидкости. В процессе роста языки случайно ветвятся и изгибаются. Перераспределение давления приводит к возникновению эффекта экранировки и подавлению роста отстающих языков. Развитие домини-

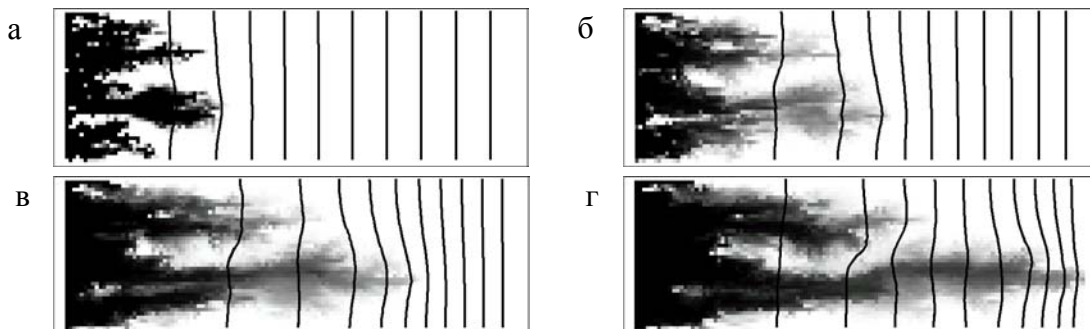


Рис. 18. Рост вязких пальцев при вытеснении раствора глицерола водой ($M=30.6$). Объем вытесненной жидкости (доля объема пор): а– 0.1; б– 0.2; в– 0.3; г – 0.4.

рующих языков сопровождается их расширением. Скорость роста вязких пальцев растет с увеличением отношения M вязкости вытесняемой жидкости к вязкости вытесняющей жидкости.

В случае неизотермического вытеснения динамика формирования неупорядоченных структур зависит также от числа Пекле Pe , характеризующего соотношение между конвективным теплопереносом и теплопроводностью, и отношения R приведенной теплоемкости подвижной жидкости к приведенной теплоемкости неподвижной части системы (неподвижная жидкость и твердая фаза). Формирование вязких пальцев происходит, когда конвективный теплоперенос преобладает над теплообменом ($Pe > 100$). Уменьшение числа Пекле приводит к расширению пальцев и замедлению их роста. Форма языков температуры и концентрации растворенного в вытесняющей жидкости несорбируемого компонента подобна, если отношение R больше единицы. Уменьшение величины R приводит к замедлению развития неустойчивости и отставанию роста языков температуры от языков концентрации и расширению последних. Если величина R много меньше единицы, то развитие неустойчивости фронта температуры происходит на фоне равномерного распределения концентрации. Образование вязких пальцев приводит к уменьшению величины эффективности вытеснения η^* . Зависимости величины η^* от числа Пекле Pe и отношения M вязкостей жидкостей представлены на рис. 19.

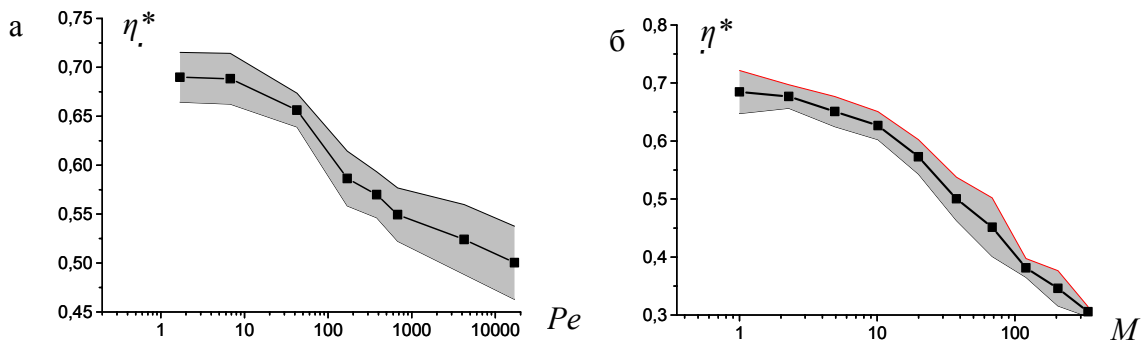


Рис. 19. Зависимость отношения η^* объема вытесненной жидкости к объему проточных пор в момент достижения несорбируемым компонентом контура стока от: а – значения числа Пекле Pe , ($M=38$); б – отношения вязкостей M жидкостей ($Pe=1.7 \cdot 10^3$). ■- среднее значение десяти компьютерных экспериментов. Серым цветом показано стандартное отклонение.

Наличие неоднородности проницаемости среды приводит к изменению распределения давления и поля скоростей. Рост вязких пальцев происходит в местах с наибольшей скоростью потока, что позволяет управлять ростом языков вытесняющей жидкости с помощью высоко- и низкопроницаемых включений (рис. 20).

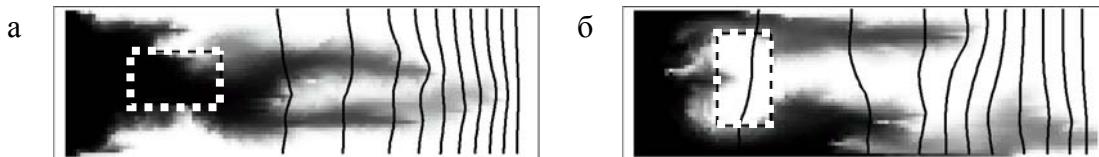


Рис. 20. Рост вязких пальцев в неоднородной среде: а – высокопроницаемое включение ($k_0/k=10$); б – низкопроницаемое включение ($k_0/k=0.1$). $M = 38$; $Pe=1.7 \cdot 10^3$; $R=1.9$; $\eta = 0.4$.

Седьмая глава посвящена исследованию формирования лапласовских структур при вытеснении несмешивающихся жидкостей.

Описаны основные особенности образования вязких пальцев, рассмотрены процессы, происходящие при двухфазной неизотермической фильтрации и приводящие к развитию гидродинамической неустойчивости, проанализированы математические модели роста вязких пальцев при несмешивающемся вытеснении.

Стохастически-детерминистическая модель двухфазной неизотермической фильтрации является обобщением модели однофазной фильтрации. Модель описывает движение вытесняющей и вытесняемой жидкостей в пористой среде, конвективный теплоперенос, теплопроводность и перераспределение давления. Движение жидкостей и конвективный теплоперенос описываются стохастически с помощью блуждающих лент тока. В данной модели блуждающие ленты тока являются стохастической интерпретацией обобщенного закона Дарси для двухфазной фильтрации. Вероятность W_n движения ленты тока в направлении $\vec{n}$ принимается пропорциональной проекции градиента давления ∇P_n на данное направление:

$$W_n = -Z^{-1} \cdot \theta(-k \cdot A(S, T) \nabla P_n) \cdot k \cdot A(S, T) \nabla P_n, \quad (16)$$

где $A(S, T) = f_1(S)/\mu_1(T) + f_2(S)/\mu_2(T)$ - подвижность потока, $f_i(S)$ - функция относительной фазовой проницаемости (индексы 1 и 2 относятся к вытесняемой и вытесняющей жидкостям соответственно), S - насыщенность (объемная доля) вытесняющей фазы. Изменение насыщенности S вытесняющей фазы вдоль ленты тока определяется уравнением Баклея – Леверетта:

$$m \partial S / \partial t = -Q \cdot \partial F(S(l)) / \partial l, \quad (17)$$

где m - пористость среды, $F(S, T) = f_2(S)/(\mu_2(T) \cdot A(S, T))$ - функция Баклея – Леверетта, l - координата вдоль ленты тока, Q - суммарный поток вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Конвективный теплопоток J_T вдоль ленты тока определяется соотношением:

$$J_T = (c_1(1 - F(S, T))Q + c_2 F(S, T)Q)T, \quad (18)$$

где c_1, c_2 - теплоемкости жидкостей.

Распределение давления P в среде рассчитывается из условия непрерывности суммарного потока в приближении жесткого режима фильтрации:

$$\nabla(k \cdot A(S, T) \cdot \nabla P) = 0. \quad (19)$$

Плотность потока энергии $\vec{J}_F$ в результате теплопроводности определяется законом Фика (15).

Созданная стохастически-детерминистическая модель позволила установить закономерности формирования вязких пальцев при несмешивающемся вытеснении более вязкой жидкости менее вязкой жидкостью, когда различие вязкостей обусловлено свойствами жидкостей и разной температурой. В отличие от однофазной фильтрации основным фактором, определяющим динамику роста вязких пальцев, является отношение M_A подвижностей потока на фронте $A(S^-)$ и перед фронтом $A(S^+)$ вытеснения ($M_A = A(S^-)/A(S^+)$). Формирование вязких пальцев имеет место, когда подвижность потока на фронте вытеснения больше подвижности перед ним. Результат моделирования формирования вязких пальцев показан на рис. 21. Скорость продвижения и размеры языков увеличиваются с рос-

том отношения подвижности на фронте к подвижности перед фронтом. Форма функций относительных фазовых проницаемостей $f_i(S)$ определяет характер распределения насыщенности вытесняющей жидкости. В неоднородной по проницаемости среде, также как и при однофазной фильтрации, положение языков определяется местами с наибольшей скоростью потока.

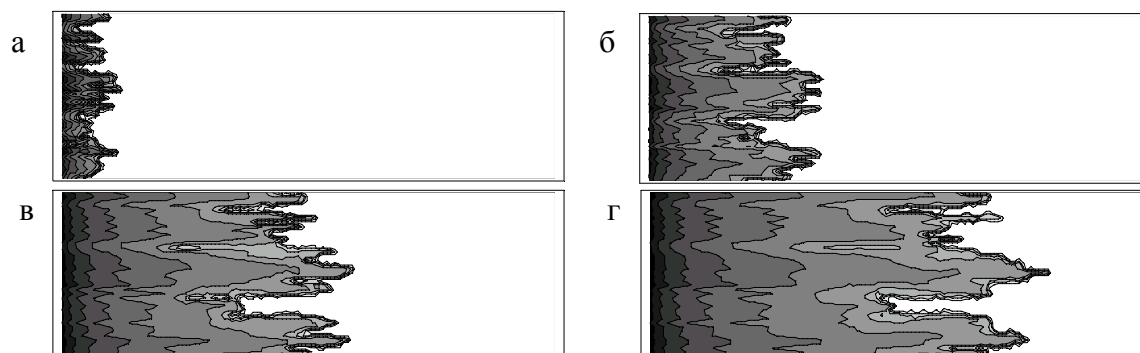


Рис. 21. Формирование вязких пальцев: а - 540с; б - 2160с; в - 3780с; г - 5400с. Серым цветом показано распределение насыщенности S , $M_A=1,96$; $\mu_1/\mu_2=16$.

В случае неизотермического вытеснения, аналогично однофазной фильтрации, динамика формирования неупорядоченных структур зависит от числа Пекле Pe и отношения R приведенной теплоемкости вытесняющей жидкости к суммарной теплоемкости породы и вытесняемой жидкости (рис. 22, 23). Рост вязких пальцев происходит, когда конвективный теплоперенос преобладает над теплопроводностью ($Pe > 100$). Уменьшение числа Пекле, при снижении скорости

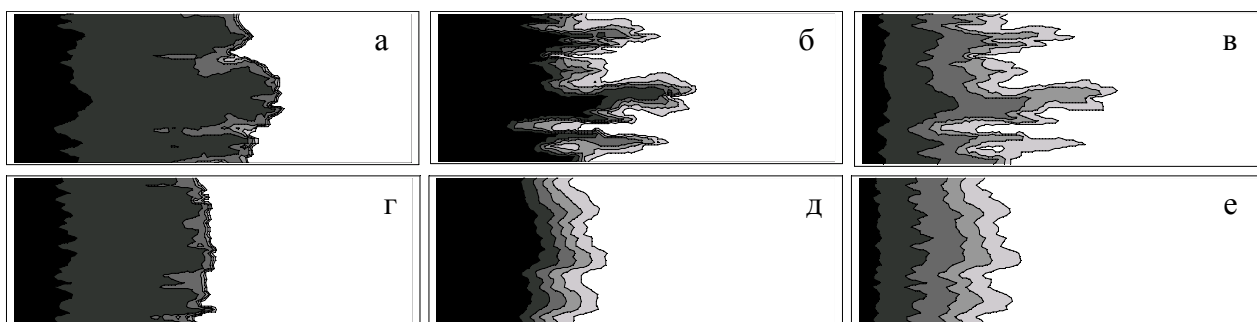


Рис. 22. Формирование вязких пальцев при различных числах Пекле: а, б, в - $Pe=1.13 \cdot 10^4$, г, д, е - $Pe=1.13 \cdot 10^2$; а, г - насыщенность; б, д - температура; в, е - подвижность.

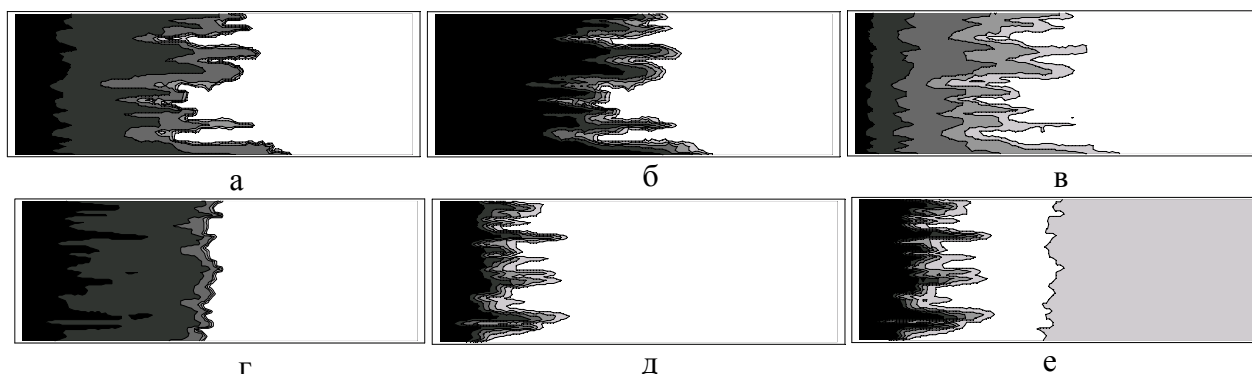


Рис. 23. Формирование вязких пальцев при различных отношениях приведенной теплоемкости вытесняющей жидкости к суммарной теплоемкости вытесняемой жидкости и породы, $T_{in}=100^\circ\text{C}$: а, б, в - $R=2,4$; г, д, е - $R=0,1$; а, г - распределение насыщенности; б, д - распределение температуры; в, е - распределение подвижности.

фильтрации и повышении теплопроводности, ведет к расширению языков вытесняющей жидкости и замедлению их роста (рис.22). В случае, когда теплоемкость вытесняющей жидкости много больше теплоемкости породы и вытесняемой жидкости ($R > 1$), форма языков температуры и насыщенности подобна. При уменьшении теплоемкости вытесняющей жидкости происходит отставание температурного фронта от фронта насыщенности. Если $R < 1$, то фронт насыщенности является стабильным, а языки температурного поля развиваются за фронтом насыщенности (рис.23).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что рост неупорядоченных структур в открытых неравновесных системах под действием поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа, характеризуется общими закономерностями и может быть рассмотрен в рамках единого подхода. Для обозначения данного класса структур введено понятие «лапласовские структуры». Показано, что основным механизмом, определяющим формирование лапласовских структур, является развитие неустойчивости Муллинса-Секерки. Инициирование неустойчивости происходит спонтанно и перманентно вследствие микронеоднородности среды и флуктуаций параметров системы. Форма лапласовских структур характеризуется случайным ветвлением и отсутствием самопересечений. Когда влияние факторов, подавляющих развитие неустойчивости, незначительно, лапласовские структуры являются фракталами.

2. Показано, что наиболее эффективным теоретическим методом изучения формирования лапласовских структур является исследование численными методами дискретных моделей роста. Достоинством детерминистических моделей роста лапласовских структур является детальное описание физических процессов, недостатком - невозможность учёта стохастичности роста, обусловленной перманентным и спонтанным инициированием неустойчивостей. Стохастические модели роста описывают основные особенности формирования лапласовских структур в открытых системах, однако являются формальными и упрощенными.

3. Для построения теоретических моделей роста лапласовских структур в сложных системах, когда существенную роль играют взаимосвязанные и нелинейные процессы переноса энергии, вещества, заряда, разработан самосогласованный стохастически-детерминистический подход, сочетающий достоинства детерминистических и стохастических методов. В рамках данного подхода детерминистические методы применяются для описания динамики потоков и полей макроскопических величин, когда имеет место усреднение флуктуаций и микронеоднородностей среды. Стохастические методы используются для описания на макроскопическом уровне результата неустойчивого нарастания микровозмущений, вызванных флуктуациями и микронеоднородностью среды.

4. На основе разработанного подхода создана стохастически-детерминистическая модель, количественно описывающая развитие электрического разряда в конденсированных диэлектриках. Рост разрядных каналов, движение электрических зарядов, изменение проводимости каналов и перераспреде-

ление электрического поля рассматриваются в модели как взаимосвязанные и согласованные процессы.

5. С помощью созданной модели определены закономерности, связывающие пространственно-временные и токовые характеристики роста разрядных структур с величиной напряжения, неоднородностью проводимости и проницаемости, а также распределением объемного заряда в диэлектрике. В частности, обнаружен эффект развития в разрядных каналах токовой неустойчивости, приводящий к трансформации кустообразной структуры в древовидную при увеличении напряжения; определены условия удержания каналов в барьерном слое с повышенной проницаемостью и притяжения разрядной структуры находящимся в диэлектрике проводящим включением. Установленные закономерности объяснены взаимосогласованными изменениями распределения электрического поля в диэлектрике, скорости роста каналов, выделения энергии электрического поля и проводимости разрядных каналов, происходящими в результате изменения величины прикладываемого напряжения, появления связанных и свободных электрических зарядов в диэлектрике.

6. Создана самосогласованная стохастически-детерминистическая модель развития молниевых разрядов. Определены пространственно-временные и токовые характеристики распространения ступенчатого лидера молнии и их связь с зарядом грозового облака. Установлены и объяснены закономерности влияния рельефа и проводимости земной поверхности на распространение нисходящего ступенчатого лидера и его ориентацию на наземные сооружения. В частности, показано, что уменьшение удельной проводимости верхнего слоя земной поверхности приводит к снижению вероятности удара молнии в высокое заземлённое сооружение.

7. Создана стохастически-детерминистическая модель электрического триинга, описывающая рост структуры заполненных газом каналов, зажигание и гашение частичных разрядов, движение зарядов по каналам в процессе развития разрядов, а также перераспределение электрического поля как взаимосвязанные и согласованные процессы.

8. Методами математического моделирования определены пространственно-временные и зарядовые характеристики формирования структуры каналов в процессе электрического триинга в зависимости от величины и вида приложенного напряжения. Развитие частичного разряда описано распространением фронта заряда и импульса электрического поля вдоль каналов. Установлена связь между параметрами частичных разрядов, формой структуры и напряжением. В частности, показано, что величина частичного разряда увеличивается с длиной его траектории (суммарной длиной каналов, принявших участие в данном разряде). Предложена концепция динамической самоорганизованной критичности, и на её основе дано объяснение экспериментальным данным и результатам моделирования частичных разрядов при электрическом триинге.

9. Созданы стохастически-детерминистические модели одно- и двухфазной многокомпонентной неизотермической фильтрации, позволяющие исследовать формирование лапласовских структур (вязких пальцев) в результате развития гидродинамической неустойчивости. Модели описывают конвективный тепло- и

массоперенос, теплопроводность, движение жидкостей и перераспределение давления в среде как взаимосвязанные и согласованные процессы.

10. Установлены основные закономерности образования вязких пальцев при вытеснении жидкости с большей вязкостью менее вязкой жидкостью с большей температурой в зависимости от фильтрационных и термодинамических характеристик жидкостей и пористой среды. В частности, показано, что рост вязких пальцев ускоряется при увеличении числа Пекле Pe и отношения M вязкостей жидкостей; уменьшение отношения приведенной теплоемкости вытесняющей жидкости к суммарной теплоемкости породы и вытесняемой жидкости приводит к образованию вязких пальцев с повышенной температурой за фронтом вытеснения; в неоднородной по проницаемости среде рост вязких пальцев происходит преимущественно в местах с наибольшей скоростью потока.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях

1. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Фрактальная модель трансформации разрядных структур в диэлектриках // Письма в ЖТФ. - 1992.-Т. 18, в. 19. - С. 71-73.
2. Носков М.Д. Электромагнитное излучение фрактально распределенных зарядов // Изв.вузов. Физика. - 1992. - N 1. - С. 111-116.
3. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Влияние объемного внедренного заряда на развитие разрядных структур в диэлектриках // Письма в ЖТФ.-1993.- Т. 19, в.23. - С. 39-44
4. Носков М.Д., Шаповалов А.В. Прохождение квантовой частицы через одномерный фрактальный потенциальный барьер // Изв. вузов. Физика.- 1993.- N7. - С. 120-127.
5. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Связь электрической прочности с мультифрактальностью распределения зарядов по поверхности электрода // Изв. вузов. Физика. - 1993. - N 11. - С. 96-99.
6. Носков М.Д. О влиянии фрактальности пространственного распределения излучающих электронов на спектр космического радиоизлучения // Астрономический журнал. - 1993. - т. 70, в. 5 - С. 1120-1122.
7. Донченко В.А., Кистенев Ю.В., Носков М.Д., Шаповалов А.В. Взаимодействие электромагнитных волн с фрактальными структурами // Изв.вузов. Физика. - 1993. - N 10.- С. 76-87.
8. Гефле О.С., Демин А.В., Кухта В.Р., Лебедев С.М., Лопатин В.В. Носков М.Д. Развитие разряда в слоистых диэлектриках // Электричество.- 1994. - N 7 - С. 61-63.
9. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Фрактальные характеристики приэлектродных образований при электрическом разряде в воде // Изв. вузов. Физика. - 1994. - N7. - С. 89-92.

10. Noskov M.D., Kukhta V.R., Lopatin V.V. Simulation of the electric discharge development in inhomogeneous insulators // J.Phys. D: Appl. Phys.- 1995.– Vol.28. - P. 1187-1194.
11. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Применение фрактальной модели к описанию развития разряда в конденсированных диэлектриках // ЖТФ.- 1995. - Т.65. в.2. -С. 63-75.
12. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Связь распределения мест инициирования разряда с неоднородностью поля на электроде // Изв. вузов, Физика. - 1995. - N 4. - С. 32-35.
13. Карпов Д.И., Лопатин В.В., Носков М.Д. Влияние высокопроводящих барьеров на развитие дендритов в диэлектрике // Электричество. - 1995.- N7. - С. 59-61.
14. Важов В.Р., Носков М.Д. Моделирование теплового пробоя неоднородных твердых диэлектриков в электрическом поле // Известия вузов. Физика.- 1996.- № 4 (приложение).- С. 37-42.
15. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д., Плешков О.И. Феноменология и моделирование импульсного разряда в воде // Известия вузов. Физика.- 1996.- №4 (приложение).- С. 63-70.
16. Lopatin V.V., Noskov M.D. Badent R., Kist K., Schwab A.J. Positive discharge development in insulating oil. Optical observation and simulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1998.-Vol. 5, N. 2.- P. 250-255.
17. Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д., Плешков О.И. Моделирование развития ступенчатого лидера молнии // ЖТФ. – 1999.-Т.69, в.4.- С.48-53.
18. Носков М.Д., Истомин А.Д. Стохастически – детерминистическое моделирование неустойчивого вытеснения несмешивающихся жидкостей // Математическое моделирование. – 1999. - Т.11, №10. - С.77–85.
19. Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Короткевич В.М., Носков М.Д., Рылин А.В. Неравномерность распространения загрязняющих веществ при подземном захоронении // Изв.вузов. Физика. – 2000 - Т.43, № 4 (приложение) - С. 93–99.
20. Курец В.И., Лопатин В.В., Носков М.Д. Влияние локальных неоднородностей на траекторию канала разряда при электроимпульсном разрушении материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2000. - №3. - С.81-87.
21. Noskov M. D., Malinovski A. S., Sack M., Schwab A. J. Self-consistent modelling of electrical tree propagation and partial discharge activity // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.- 2000. - Vol. 7, No. 6. -P. 725-733.
22. Носков М.Д., Малиновский А.С. Динамика формирования фрактальных структур в процессе электрического триинга // Вестник Карагандинского университета. Серия естественных наук. – 2000. - №1. – С. 164-167.
23. Курец В.И., Носков М.Д. Стохастические и детерминистические аспекты формирования разрядных структур // Вестник Карагандинского университета. Серия естественных наук. – 2000. - №1. – С. 56-59.
24. Носков М.Д., Рылин А.В. Стохастическое моделирование развития неустойчивости Тейлора при фильтрации жидкостей в пористой среде // Инженерно-физический журнал. – 2000. - Т.73, №2. - С. 267-273.

25. Носков М.Д., Истомин А.Д. Стохастически – детерминистическое моделирование развития гидродинамической неустойчивости при неизотермической двухфазной фильтрации // Математическое моделирование. – 2000. - Т.12, №10. - С.19–30.
26. Балахонов В.Г., Буров Ю.В., Данилов В.В., Зубков А.А., Матюха В.А., Сухоруков В.А., Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носков М.Д. Динамика температурного и радиационного полей в пласте-коллекторе полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. – 2000. - №4. – С.31-35.
27. Балахонов В.Г., Зубков А.А., Матюха В.А., Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Носков М.Д., Егоров Г.Ф., Кудрявцев Е.Г. Математическое моделирование радиационно-химического разложения органических примесей жидких радиоактивных отходов при глубинном захоронении // Радиохимия. – 2001. - №1. - С.82–86.
28. Балахонов В.Г., Матюха В.А., Зубков А.А., Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Носков М.Д. Оценка безопасности совместного захоронения органических и водных САО // Вопросы радиационной безопасности. – 2001. - №3. – С.15-19.
29. Носков М.Д., Чеглоков А.А., Шаповалов А.В., Динамика развития тепловой неустойчивости при пробое диэлектрика // Известия вузов. Физика.- 2001. - №1.- С. 38-43.
30. Noskov M. D., Sack M., Malinovski A.S., Schwab A.J. Measurement and simulation of electrical tree growth and partial discharge activity in epoxy resin // J.Phys. D: Appl. Phys.- 2001. - Vol. 34. N9 - P. 1389-1398.
31. Noskov M. D., Sack M., Malinovski A.S., Schwab A.J. Self-organized criticality in electrical treeing // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. - 2001. - Vol 301, N 1. - P 85-96.
32. Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г. Стохастически – детерминистическое моделирование развития гидродинамической неустойчивости при фильтрации смешивающихся жидкостей // Инженерно-физический журнал. – 2002. - Том.75, №2. - С. 69-74.
33. Ларин В.К., Зубков А.А., Балахонов В.Г., Сухоруков В.А., Жиганов А.Н., Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г. Моделирование динамики радиационных и тепловых полей при глубинном захоронении жидких отходов // Атомная энергия.- 2002.- Т.92, в.6.- С. 451–455.
34. Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г. Стохастически – детерминистическое моделирование развития гидродинамической неустойчивости при неизотермической фильтрации // Инженерно-физический журнал. - 2002.- Т.75, №5. - С. 108-114.
35. Noskov M.D., Malinovski A.S., Cooke C.M., Wright K.A., Schwab A.J. Experimental study and simulation of space charge stimulated discharge // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol.92, N9. – P.4926-4934.
36. Носков М.Д., Малиновский А.С., Закк М., Шваб А.Й. Моделирование роста дендритов и частичных разрядов в эпоксидной смоле // ЖТФ. - 2002.- Т.72, в.2.- С.121-128.

37. Носков М.Д., Малиновский А.С., Кук Ч.М., Урайт К.М., Шваб А.Й. Моделирование развития разряда в объемно-заряженном диэлектрике // ЖТФ.- 2002. - Т.72, в.4. - С. 107-112.
38. Noskov M.D., Malinovski A.S., Sack M., Schwab A.J. Modelling of partial discharge development in electrical tree channels // IEEE Trans. Dielectrics and EI. – 2003. – Vol.10, No.3. – P.425-434.
39. Носков М.Д., Лопатин В.В., Чеглоков А.А., Шаповалов А.В. Исследование роста разрядного канала при тепловом пробое диэлектрика // Известия вузов. Физика. -2003.- Т.46, N1 - С. 87-90.

Статьи в сборниках

40. Noskov M.D., Kukhta V.R., Lopatin V.V. The role of multifractality in charge distribution on electric strength // Proc. 11 Int. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Baden-Dattwil, Switzerland. - 1993. - P. 209-213.
41. Lopatin V.V., Kukhta V.R., Noskov M.D. Fractal description of discharge propagation in liquid // Proc. 11 Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. Baden-Dattwil, Switzerland. - 1993. - P. 204-208.
42. Lopatin V.V., Noskov M.D., Karpov D.I. The effect of the barriers with high conductivity and dielectric permittivity on the dendrite development in dielectric // Proc. 9 Int. Symp. High Voltage Engineering, Graz, Austria, - 1995. –Vol.1.- P. 1075, 1-3.
43. Карпов Д.И., Носков М.Д., Плешков О.И. Стохастическое моделирование предпробойных процессов в слабопроводящих жидкостях // Современные проблемы электрогидродинамики и электрофизики жидких диэлектриков: Докл. IV Международной конференции, Санкт-Петербург. - 1996. - С. 77-84.
44. Noskov M., Karpov D., Lopatin V., Pleshkov O. The simulation of the discharge channels propagation in liquids // Proc. 12 Int. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy.- 1996.- P. 263-266.
45. Dulzon A.A., Noskov M.D., Lopatin V.V., Shelukhin D.V. The strike points distribution from fractal model of the stepped leader // Proc. 10 Int. Conf. Atmospheric Electricity, Osaka, Japan.- 1996.- P. 260-263.
46. Lopatin V.V., Noskov M.D., Badent R., Kist K., Schwab A.J. Experimental study and simulation of predischage phenomena in insulating oil // Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, USA. – 1996. - P. 356-360.
47. Lopatin V.V., Noskov M.D., Pleshkov O. I. Simulation of earth surface features effects on lightning strike points distribution // Proc. 12 Int. Conf. Gas Discharges and their Applications, Greifswald, Germany. – 1997. –Vol.2 - P. 432-435.
48. Malinovski A.S., Noskov M.D., Sack M., Schwab A.J. Simulation of partial discharges and electrical tree growth in solid insulation under ac voltage // Proc. 6 Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Vasteras, Sweden. – 1998. - P. 305-308.
49. Noskov M.D., Lopatin V.V., Pleshkov O. I. Simulation of the lightning leader orientation // Proc. 2 Russian–Korean Int. Symp. Science and Technology, Tomsk, Russia. – 1998. - P. 100-103.
50. Жиганов А.Н., Носков М.Д., Рылин А.В. Моделирование развития неустойчивости Сэффмана-Тейлора при неизотермической фильтрации // Доклады все-

- русской научной конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”.-Томск. - 1998. - С. 252-253.
- 51.Noskov M.D., Malinovski A.S., Sack M., Schwab A.J. Computer investigation of voltage effect on electrical treeing // Proc. 11 Int. Symp. on High Voltage Engineering, London, England. – 1999. - Vol.2. - P. 136-139.
- 52.Noskov M.D., Malinovski A.S., Sack M., Schwab A.J. Numerical investigation of insulation conductivity effect on electrical treeing // Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ostin, USA. – 1999. - P. 597-600.
- 53.Kukhta V.R., Lopatin V.V., Noskov M.D. Relation between discharge initiation points and electrical field non-uniformity on electrode surface // Proc. 13 Int. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Nara, Japan.-1999. - P. 269-272.
- 54.Истомин А.Д., Носков М.Д. Математическое моделирование развития неустойчивости Сэфмана-Тейлора при двухфазной фильтрации // Мат. моделирование процессов в синергетических системах: Сб. тр., Томск. 1999. - С.90–94.
- 55.Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г. Стохастически-детерминистическое моделирование реакционно-фильтрационной самоорганизации// Мат. моделирование процессов в синергетических системах: Сб. тр., Томск, 1999. - С.106–109.
- 56.Носков М.Д., Малиновский А.С. Самосогласованный подход к моделированию роста разрядных каналов в жидких диэлектриках // Современные проблемы электрогидродинамики и электрофизики жидких диэлектриков: Материалы VI Международной конференции, Санкт-Петербург– 2000. - С. 159-162.
- 57.Носков М.Д. Стохастически-детерминистическое моделирование самоорганизации в открытых системах // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. II Международной конф., Самара. - 2000. - С. 86–92.
- 58.Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носков М.Д. Синергетический подход к моделированию сложных геохимических систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. II Международной конф., Самара. – 2000. - С. 93–99.
- 59.Balakhonov V., Zhiganov A., Istomin A., Noskov M. Modeling of underground water contamination by non aqueous liquids // Proc. 4 Korea–Russia Int. Symp. Science and Technology, Ulsan. - 2000, P. 266–271.
- 60.Noskov M.D., Malinovski A. S. Fractal stochastic deterministic approach to modeling of electric discharge development in liquid dielectrics // Proc. 4 Korea–Russia Int. Symp. Science and Technology, Ulsan. - 2000. - P. 105–108.
- 61.Noskov M.D., Cheglov A.A., Shapovalov A.V. Computer investigation of spatial-temporal evolution of the thermal instability // Proc. CEIDP 2000, Victoria, Canada.- 2000. - Vol.2. - P. 145–148.
- 62.Sack M., Schwab A.J, Malinovski A. S., Noskov M. D. Electrical treeing in epoxy resin: experimental investigation and simulation // Proc. CEIDP 2000, Victoria, Canada. -2000. - Vol.1. - P. 453–456.
- 63.Noskov M.D., Pleshkov O.I., Lopatin V.V. Computer modeling of earth conductivity and relief effects on lightning orientation // 25th Int. Conf. Lightning protection, Rhodos, Greece. - 2000. - P.389-394.

64. Носков М.Д., Балахонов В.Г., Истомин А.Д. Стохастически-детерминистическая модель тепломассопереноса при двухфазной фильтрации в среде с двойной пористостью // Тр. IV Минского международного форума “Тепломассообмен ММФ–2000”, Минск.–2000.– Т.8.- С.30–39.
65. Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Носков М.Д., Балахонов В.Г., Зубков А.А. Моделирование поведения органических загрязняющих веществ в подземных водоносных горизонтах // Тр. Междун. конф. “Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия”, Томск –2000.- С.389–393.
66. Жиганов А.Н., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носков М.Д., Балахонов В.Г., Зубков А.А. Гидрогеохимическая самоорганизация при подземном захоронении жидких отходов // Тр. Междун. конф. “Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия”, Томск –2000.- С.394–398.
67. Noskov M. D., Cooke C. M., Malinovski A.S., Schwab A.J., Wright K.A. Spatial-temporal and current characteristics in space charge stimulated discharges // Proc. 4 Int. Conf. on electric charges in non-conductive materials, Tours. - 2001- P. 57–60.
68. Sack M., Noskov M. D., Malinovski A.S., Schwab A.J. Dynamics of charge transport in electrical treeing under ac voltage // Proc. 4 Int. Conf. on electric charges in non-conductive materials, Tours. - 2001- P. 413–416.
69. Noskov M.D., Lopatin V.V., Cheglov A.A., Shapovalov A.V. Computer simulation of discharge channel in solid dielectric // Proc. 7 Int. Conf. on Solid Dielectrics, Eindhoven. –2001.- P. 465–468.
70. Cheglov A.A., Noskov M.D., Lopatin V.V., Shapovalov A.V. Simulation of spark channel formation for electrical discharge technology // Proc. 5 Korea–Russia Int. Symp. Science and Technology, Tomsk, 2001.- P. 224–228.
71. M.Noskov, Lopatin V., Kurets V. Effect of conductivity and permittivity inhomogeneity on discharge channel orientation // Proc. Int. Conf. on pulse power applications, Gelsenkirchen, 2001. - P. F.06/1– F.06/6.
72. Истомин А.Д., Носков М.Д. Стохастическое моделирование роста колоний бактерий // Мат. модели и методы их исследования. Тр. Междун. конф., Красноярск. - 2001. -Т.1. - С.282–285.
73. Лопатин В.В., Носков М.Д., А.А.Чеглоков, А.В.Шаповалов. Моделирование роста разрядного канала при пробое диэлектрика// Мат. модели и методы их исследования. Тр. Междун. конф., Красноярск.-2001.-Т.1.- С.290–294.
74. Кеслер А.Г., Носков М.Д., Истомин А.Д. Моделирование развития гидродинамической неустойчивости Сэффмана – Тэйлора при фильтрации смешивающихся жидкостей // Мат. модели и методы их исследования. Тр. Междун. конф., Красноярск. - 2001. -Т.1. - С.296–299.
75. Носков М.Д., Истомин А.Д. Моделирование развития гидродинамических неустойчивостей при вытеснении нефти рабочим агрегатом // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности: Сборник науч. тр. – Томск, 2002. – Т.2. – С. 306-314.
76. Noskov M.D., Malinovski A.S., Sack M., Schwab A.J. Simulation of partial discharge development in long narrow channel // Proc. 8 Int. Conf. Optimization of electrical and electronic equipment, Brasov, Romania. – 2002. – P.135-140.