

*На правах рукописи*

Храмченкова Резида Хавиловна

**Физико-структурные характеристики почвы и их влияние  
на энерго-массообмен между почвой и нижней  
атмосферой**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань – 2006

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте математики и механики им. Н. Г. Чеботарева Казанского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
доцент Чекалин Анатолий Николаевич

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Фахрутдинова Антонина Николаевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
доцент Овчинников Марат Николаевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор Якимов Николай Дмитриевич

Ведущая организация – Институт экологического почвоведения МГУ им  
М. В. Ломоносова

Защита состоится « 29 » июня 2006 г. в 14.30 часов в ауд. 210 физического факультета на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного университета

Автореферат разослан 25 мая 2006 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



А. В. Карпов

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Почва является зоной контакта трех важнейших сфер Земли – атмосферы, гидросферы и литосферы, что предопределяет специфику почвы как физической системы. Одним из главных компонентов этой системы является почвенная влага. Ее накопление и динамика определяются как взаимодействием с атмосферой, так и с подземными и поверхностными водами. Это позволяет рассматривать почвенную влагу как особую составляющую гидросферы Земли, причем ее свойства и движение обусловлены действием специфических сил, главным образом со стороны поверхности почвенных частиц. Специфика почвенной влаги проявляется и в том, что ее движение происходит в двух формах – форме пара и в конденсированном состоянии. Эти проблемы являются объектом исследования многих научных дисциплин, поэтому в последнее время все более остро встает вопрос о выработке единого описания накопленных знаний. Таким описанием может служить представление накопленных знаний в виде математических закономерностей.

Разработка математических моделей протекающих процессов позволяет с единых теоретико-экспериментальных позиций рассматривать вклад того или иного явления в процесс в целом. Кроме того, математическая модель позволяет выработать количественные рекомендации по предотвращению негативных воздействий на систему или усилению позитивных воздействий, что дает возможность подойти к выработке рациональных инженерных решений. При решении задач корректного математического описания гидроаэрофизических процессов в почвах необходимо учитывать как накопленные экспериментальные и теоретические результаты по изучаемым процессам, так и разрабатывать новые экспериментальные и теоретические подходы к дополнению и объединению таких результатов, причем с единых методологических позиций. Особую важность здесь имеет экологический аспект решаемых задач. Дело в том, что почва, как известно, является одной из важнейших составляющих биосферы. В связи с этим изучение влияния различных загрязнений на процессы, протекающие в почвах, особенности деградации почв, переноса загрязнений в почвах являются актуальными с точки зрения их влияния на все более усиливающееся загрязнение атмосферы, гидросферы и биосферы.

Интенсификация загрязнения окружающей среды в последнее время затронула в значительной мере и почвенный покров. Выбросы вредных веществ, разливы отходов химических производств, нефти и нефтепродуктов приводят к интенсивному загрязнению почвы и, как следствие, к необходимости прогноза по изменению свойств загрязненной почвы и влияния таких процессов на влаго- и теплообмен почвы и атмосферы.

Все вышесказанное позволяет сформулировать **цель работы:** изучение физико-структурных характеристик почвы и их влияния на энерго-массообмен между почвой и нижней атмосферой.

Из всего множества взаимосвязанных задач физики почв и гидрофизики атмосферы выбраны для исследования пять. Во-первых, это разработка моделей набухания почвенных частиц в зависимости от различных физических факторов (влажность, механическая нагрузка, физико-химические свойства почвы и др.). Во-вторых, массоперенос в ненасыщенных набухающих пористых средах, к которым относятся почвы. В третьих, задачи, связанные с электрохимическими характеристиками почв. В четвертых, задачи, связанные с процессами взаимодействия органической и неорганической частей почвенной матрицы и формирования водопрочной структуры почвы. И, в пятых, задачи о влаго- и теплообмене между почвой и турбулентной атмосферой.

Первый класс задач традиционно связан с проблемами термодинамики почвенной влаги в набухающих почвах. Свойства почвенной матрицы при этом суммируются в нескольких эффективных параметрах, таких, например, как емкость катионного обмена, которые затем входят в уравнения равновесия для набухающих систем. В итоге показано, что загрязнение почв ведет к снижению одной из важнейших характеристик почвы - ее водоудерживающей способности.

Второй класс задач связан с необходимостью разработки подходов к описанию процессов массопереноса в набухающих пористых средах, к которым относятся и почвы, а также влияния механического и химического воздействия на состояние и свойства почв.

Третий класс задач связан с проблемой влияния различных факторов, включая загрязнение почвы, на изменение важнейших характеристик почвы. Анализируются различные механизмы переноса в почвах растворов, в том числе и содержащих загрязняющие вещества, активно влияющие на динамику процес-

сов набухания и усадки в почвах, а, следовательно, и на весь комплекс физико-структурных характеристик почвы.

Четвертый класс задач связан с изучением процессов взаимодействия органической и неорганической части почвенной матрицы, в том числе процессов формирования водопрочных почвенных агрегатов, процессов растворения почвенного гумуса, влияния на эти процессы загрязнения почв, а также анализа факторов стабилизации почвенного гумуса.

Пятый класс задач связан с особенностями теплообмена и влагообмена между почвой и турбулентной атмосферой. В этих процессах существенную роль играют именно физико-структурные характеристики почвы, исследованию которых посвящены первые четыре главы настоящей работы.

#### **Основные задачи исследования:**

1. На основе методов термодинамики набухающих систем разработать модели массообмена в набухающих почвах и исследовать в рамках этих моделей влияние различных факторов на физико-структурные характеристики почвы.
2. На основе объединения методов теории массопереноса в пористых средах и методов термодинамики набухающих систем разработать модель физико-механических и физико-химических свойств почвы, позволяющую с единых позиций подойти к анализу широкого комплекса вопросов о влиянии загрязнения на важнейшие характеристики почв (реология почв, перенос и диффузия в почвах, электрохимические и буферно-емкостные свойства почв).
3. На базе методов теории массопереноса в набухающих средах разработать модель изменения важнейших транспортных характеристик почвы, связанных с протеканием процессов переноса загрязнений в почвах.
4. На базе проведенных экспериментальных исследований и теоретического анализа процесса агрегатообразования в почвах подойти к анализу основных свойств почвенных агрегатов, в том числе к свойству водопрочности, при взаимодействии неорганической и органической составляющих почвенной матрицы.
5. На основе полученных результатов разработать модели, учитывающие влияние физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и турбулентной атмосферы, а также последствия изменения этих параметров.

#### **На защиту выносятся**

1. уравнения физико-химической механики почвы и оценка влияния негативно-го механического воздействия на почву;
2. модель буферных свойств почвы;
3. модель электрохимических свойств почв;
4. модель формирования водопрочной агрегатной структуры почвы;
5. модель для оценки влияния физико-структурных характеристик почвы на процесс энерго-массообмена почвы и нижней атмосферы.

### **Научная новизна работы**

Среди новых результатов, полученных автором диссертации, наиболее значительными представляются следующие:

- построение на основе теории массопереноса в почвах и термодинамики почв модели набухания и массообмена в почвах, позволяющих оценить влияние различных факторов на водоудерживающую способность почв;
- построение модели физико-механических и физико-химических свойств набухающих пористых сред и ее приложения к почвам и процессам энерго-массообмена с атмосферой;
- построение на базе разработанной модели массообмена в почвах решения ряда задач массопереноса в почвах;
- разработка модели электрохимических свойств почв и ее связи с физико-структурными характеристиками почвы;
- разработка модели, позволяющей проследить процесс взаимодействия минеральной и органической составляющей почвенной матрицы (биокосные процессы) и его влияния на формирование структуры почвы (процесс агрегатобразования);
- разработка модели энерго-массообмена почвы и турбулентной атмосферы и влияния на этот процесс основных физико-структурных характеристик почвы

### **Научно-практическое значение работы**

Работа носит теоретический и прикладной характер. Предложенные модели набухания почвенной матрицы и массопереноса химических примесей в пористых средах позволяют оценить влияние механического и химического воздействия на водоудерживающую способность почвы, что может быть использовано при проектировании хранилищ для химических и радиоактивных отходов, а также решении инженерных задач по обработке почвенного покрова. В результате изучения процесса взаимодействия неорганической и органической со-

ставляющей почвенной матрицы была предложена модель формирования водопропрочной структуры почвы, позволяющая теоретически рассчитать эффективный радиус водопропрочных агрегатов. Полученные в итоге математические зависимости позволяют прогнозировать влияния физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и турбулентной атмосферы и, как следствие, на формирование климата Земли.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается применением при разработке физико-математических моделей общих законов и уравнений термодинамики и механики сплошных сред. Проведенный сравнительный анализ решений полученных уравнений показывает хорошее соответствие этих результатов в частных случаях с экспериментальными данными.

**Личный вклад** диссертанта заключается в разработке модели формирования водопропрочной структуры почвы, модели влияния физико-структурных характеристик почвы на теплофизические характеристики почвы и, тем самым, на энерго-массообмен почвы и нижней атмосферы, а также в проведении расчетов теоретических зависимостей, обработке результатов и сравнение их с собственными и литературными экспериментальными данными.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- «Структура и динамика молекулярных систем», Яльчик, 2003 г.;
- «Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации», Москва, 2003 г.;
- «Структура и динамика молекулярных систем», Яльчик, 2004 г.;
- Euro-Conference on Rock Physics and Rock Mechanics, Potsdam, 2004.

#### **Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, содержит 120 страниц сквозной нумерации, в том числе 4 таблицы и 31 рисунок; список литературы насчитывает 102 наименований, в том числе публикации автора по теме диссертации – 11 наименований.

**Во введении** обсуждается актуальность темы, формулируются цель и положения, выносимые на защиту. Приводится обзор работ, имеющих отношение к результатам автора. Дается анализ структуры и содержания диссертации. Необходимо отметить, что по вопросам, о которых идет речь в диссертации, име-

ется обширная литература. В наши задачи не входило подробное изложение основных представлений по термодинамике и физике почв или свойствам почвенной влаги. Тем не менее, необходимо отметить, что все новые результаты этой и остальных глав базируются на известных концепциях. Так, основные результаты по теории осмотической набухающей ячейки опираются на работы Р. И. Злочевской и В. А. Королева. Огромное влияние также оказали работы Л. И. Кульчицкого, Г. Спозито и С. Иваты. В них изложены основные результаты по термодинамике и физической химии почвенной влаги, на которых построены все результаты первой главы книги. Из работ по теории массопереноса в почвах хотелось бы выделить прежде всего известные монографии Т. Маршалла и Дж. Холмса, а также Д. Митчелла. Кроме того, в этих работах содержится обширный экспериментальный материал по основным свойствам почв, сведения по вещественному составу почвы, основные концепции сложных взаимосвязанных явлений при переносе веществ в почвах (coupled processes), и ряд других. Важными являются пионерские экспериментальные исследования Д. Летти и А. Клютте, а также работа К. Норриша по внутрикристаллическому набуханию. В диссертации используются модели многофазного массопереноса, изложенные в книгах и статьях Г. И. Баренблатта, В. М. Ентова, Я. Бэра, кинетики химических реакций в ходе процессов массопереноса (прежде всего работа Д. А. Франк-Каменецкого), теории массопереноса в тонких пленках (работы Б. В. Дерягина и Н. В. Чураева, обобщенные в их совместной монографии). Важную роль играют классические монографии по физике атмосферы, прежде всего А. Х. Хргиана, а также А. Р. Константинова, в которых рассматриваются вопросы тепло- и влагообмена почвы и атмосферы.

**Первая глава** посвящена вопросам, связанным с термодинамическими и физико-механическими характеристиками почвы и, в частности, почвенной влаги. Основное внимание уделялось нами необходимому уточнению классических результатов по осмотическому равновесию в почвах как ионообменных системах. Были использованы результаты для моделирования физико-механических свойств почв на основе расширенного принципа доннановского равновесия (в смысле его обобщения для ионообменных набухающих систем). Показано, что загрязнение почвы снижает водоудерживающую способность почв.

**Первый раздел** главы посвящен описанию почв как ионообменных систем, чья способность к набуханию обусловлена наличием электрического заряда

у системы, который компенсируется за счет адсорбции катионов из раствора. Поскольку условия равновесия в таких системах (доннановское равновесие) должны дополняться условиями электрической нейтральности системы в целом, то мы приходим к новым уравнениям, позволяющим описывать процесс набухания при известных значениях некоторых параметров. Эти системы были нами названы осмотическими ячейками (рис. 1).

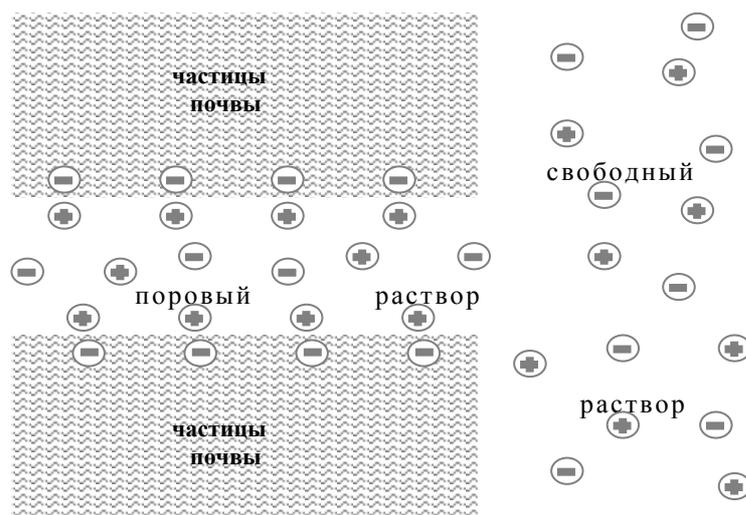


Рис.1. Схема осмотической ячейки, образованной почвенными частицами

**Второй раздел** главы посвящен решению уравнений равновесия в осмотических ячейках. В частности, было получено решение для уравнения набухания, связывающего давления в растворе и среде и концентраций ионов в растворе и ионообменной системе. Это уравнение позволяет интерпретировать полученные результаты с точки зрения физико-химической механики пористых сред и, таким образом, связать основные параметры физико-химического характера с параметрами, имеющими гидрофизический и теплофизический смысл. В этом смысле полученные результаты перекидывают «смысловой мостик» между термодинамикой почв и механикой почв, которой посвящен второй раздел книги.

**Вторая глава** содержит основные уравнения механики пористых сред в условиях неполного насыщения влагой, учитывающие эффект от перехода воды из транспортных пор в состав почвенных частиц или обратно (набухание/усадка). Основные уравнения получены на основе обобщения подходов классической фильтрационной консолидации и теории фильтрации в ненасыщенных пористых средах.

**Первый раздел** посвящен выводу уравнения баланса массы в почвах. Основной результат получен как обобщение результатов для набухающих систем в условиях полного насыщения на системы, находящиеся в условиях неполного насыщения водой.

$$-\partial[m(1-s)]/\partial t + [1-m(1-s)]\partial\theta/\partial t + \operatorname{div}\vec{q} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\theta$  – общая усадка почвы,  $m$  – пористость,  $s$  – водонасыщенность,  $\vec{q}$  – скорость фильтрации. Результирующее уравнение имеет ясный физический смысл, допускает сведение к известным частным случаям и в этом смысле корректно.

**Второй раздел** главы посвящен уравнению баланса импульса в локально-равновесной форме (уравнения механического равновесия) для почв. Уравнение позволяет использовать результаты первой главы, связывающие основные параметры набухающих систем с приложенной к ним механической нагрузкой. Таким образом, удастся не только корректно ввести эффективные напряжения для набухающей системы в условиях неполного влагонасыщения, но и установить взаимосвязь этой величины с осмотическим давлением в набухающей системе. Из условия механического равновесия и решения уравнения (1) получена зависимость плотности почвы от нагрузки, вид которой приводится на рис. 2.

**Третий раздел** главы посвящен фильтрации в почвах. Содержание раздела достаточно традиционно и посвящено обзору основных закономерностей ненасыщенной фильтрации (см. результаты П.Я.Кочинной, Ричардса, Филиппа и др.).

**Четвертый раздел главы** посвящен собственно процессу набухания/усадки почв и грунтов. В основу положено уравнение кинетики набухания/усадки, основанное на пропорциональности силы, вызвавшей поток жидкости при набухании, самому потоку. Такой подход является в этом смысле традиционным при моделировании неравновесных процессов, к коим относится и изучаемый нами процесс набухания/усадки почв. Здесь получено простейшее решение задачи набухания слоя грунта под постоянной нагрузкой для стационарного фильтрационного потока.

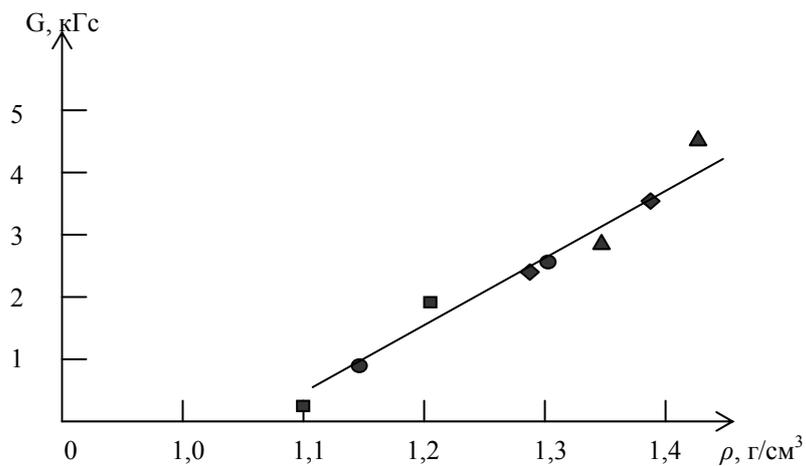


Рис. 2. Зависимость плотности почв от удельного давления. Прямая линия – результат расчетных данных. Точками обозначены данные для ширины шин трактора:

150 - 600 мм - ■    15 - 30 мм - ●  
 12 - 38 мм - ◆    10 - 42 мм - ▲

Проведено сравнение результатов расчетов по изменению усадки и пористости среды с результатами эксперимента и доказано хорошее согласие расчетных и опытных данных. Кроме того, предложена модель по выявлению связи между динамикой процесса набухания/усадки и агрегатным составом почвы. Установлено, что максимально быстрому впитыванию влаги слоем почвы или максимально быстрой сушке соответствует структурирование почвы в агрегаты строго определенного размера. Это позволяет подойти к решению проблемы о распаде первоначально гомогенной почвенной массы в процессе сушки на агрегаты размера, определенного для каждого типа почв, а также проследить влияние механического воздействия на почву, снижающего одну из важнейших характеристик почвенного покрова - величину водоудерживающей способности.

**Третья глава** посвящена вопросам моделирования процесса массопереноса в почве и буферной функции почвы при загрязнении гидросферы.

**В первом разделе** главы рассмотрена задача о конвективном массопереносе пассивной в химическом отношении примеси фильтрационным потоком. Получено решение задачи о хранилище загрязнений, получены соотношения для коэффициентов распределения примеси в почве.

**Во втором разделе** главы рассмотрен процесс диффузии в почве. Так же, как для процесса диффузии электролитов в глинах, установлены нелинейные

уравнения для диффузии в почве. Получены выражения для эффективного коэффициента диффузии в почве. Соотношение

$$D_{f,s} = D \left( m_p + m_c \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{C+1}} \right) \quad (2)$$

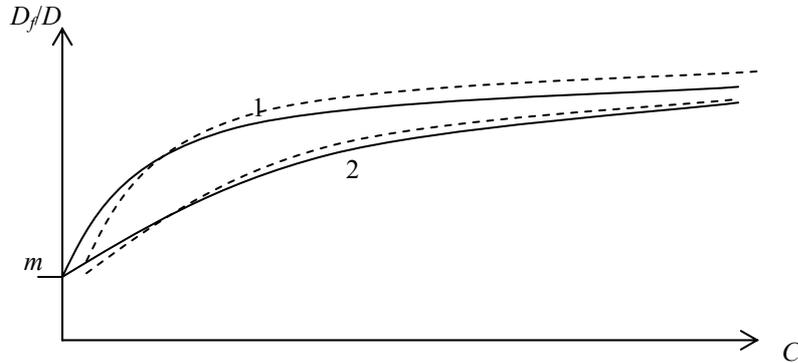


Рис.3. Зависимость коэффициента диффузии от концентрации загрязнения: 1 – набухающая почва, 2 – ненабухающая почва; штриховые линии – экспериментальные данные

можно рассматривать как эффективный коэффициент диффузии раствора в почве в зависимости от концентрации примеси (загрязнителя) в растворе  $C$ . Соответствующее выражение для случая ненабухающей почвы имеет вид

$$D_{f,u-s} = D \left( m_p + m_c \frac{C}{\sqrt{e_h^2 + C^2}} \right). \quad (3)$$

Вид кривых зависимости коэффициента диффузии примеси в растворе от концентрации примеси находится в хорошем согласии с данными экспериментов (рис. 3).

**В третьем разделе** главы рассматриваются закономерности изменения основных электрохимических параметров почвы в зависимости от концентрации пассивной химической примеси в почве. Построена теоретическая модель электрохимических свойств набухающих и ненабухающих почв на базе представления об осмотической ячейке. Далее, проведено сравнение расчетных данных с соответствующими данными двух экспериментальных работ (известные работы Д. Летти и А. Клютте) по этому вопросу.

**Четвертая глава** работы посвящена изучению и моделированию физико-структурных характеристик почвы как границы между атмосферой и гидросферой.

**Первый раздел** главы посвящен собственно вопросу об агрегировании почвенной массы. На основании экспериментальных результатов, приведенных в работе группы авторов (*Кринару и др., 2003*) разработаны основные предпосылки для построения математической модели процесса агрегатообразования в почвах.

**Во втором разделе** проведена реализация модели наиболее простого сценария процесса агрегатообразования. Полученные данные качественно согласуются с основными характеристиками такого процесса, выявленными экспериментально. Исследован процесс массопереноса в биокосных системах и его приложения к процессу почвообразования.

**Третий раздел** главы посвящен анализу факторов, стабилизирующих органическое вещество почв. Постановка следует из анализа результатов предыдущей главы. Показано, что при определенных (очевидных) предположениях о характере протекания процессов взаимодействия органического вещества почвы с минеральной матрицей процесс почвообразования характеризуется параметрами, отвечающими механическому равновесию (устойчивости) образующей органно-минеральной структуры.

**Пятая глава** посвящена вопросам о влиянии физико-структурных характеристик почвы на процессы теплообмена и влагообмена почвы и нижней (турбулентной) атмосферы.

**В первом разделе** главы построены основные соотношения для связи физико-структурных характеристик почвы с основными теплофизическими параметрами почвы. Соответствующее выражение для основного параметра – теплоемкости почвы – имеет вид

$$c_V = c_{V_w} s \left[ \frac{m_{ef}}{1 + s + s^2} + 1 - \frac{V_s}{V_0} \right] + c_{V_s} \frac{V_s}{V_0}. \quad (4)$$

Здесь  $c_{V_w}$  – теплоемкость воды;  $s$  – водонасыщенность почвы;  $c_{V_s}$  – теплоемкость твердого почвенного материала;  $V_s$ ,  $V_0$  – объемы твердого материала и элемента всей среды соответственно, а также введено обозначение для эффективной пористости

$$m_{ef} = \frac{0,5RTe}{s_0 p_0 V_0}. \quad (5)$$

**Во втором разделе** главы исследуется влияние основных физико-структурных характеристик почвы на суточный и годовой ход температуры поверхности почвы и радиационный обмен почвы и атмосферы. Получено выражение для основного управляющего суточным и годовым ходом температуры поверхности почвы параметра процесса – коэффициента теплоусвоения  $M$

$$M = M_0 \left[ \sqrt{\delta_t \delta_m} \varphi(s) + \frac{V_s}{V_0} \right]. \quad (6)$$

Здесь используется обозначение

$$\varphi(s) = \frac{m_{ef}}{1 + s + s^2}. \quad (7)$$

Анализ полученного уравнения показал, что чем больше в составе почвы находится обеспечивающей набухание компоненты (глинистые минералы, почвенная органика), тем меньше амплитуда суточных и годовых колебаний температуры поверхности почвы.

**В третьем разделе** главы исследуется влияние физико-структурных характеристик почвы на процесс испарения почвенной влаги, приводится оценка для потоков испаряющейся влаги по капиллярам и по тонким порам почвенной матрицы (осмотическое перемещение влаги):

$$J_f / J_w = \rho_f K_s E_w / \rho_w D \quad (8)$$

Установлено, что полученные нами уравнения для основных физико-структурных характеристик почвы дают правильную оценку процесса испарения почвенной влаги по порам и вследствие пленочного течения почвенной влаги.

**В четвертом разделе** главы исследуется влияние физико-структурных характеристик почвы на теплообмен и влагообмен почвы и турбулентной атмосферы, дается анализ глобальных последствий вследствие изменений физико-структурных характеристик почвы, вызванных техногенными причинами.

**В заключении** сформулированы основные выводы, полученные в диссертационной работе:

1. выведены уравнения физико-химической механики почвы, из анализа которых получены зависимости плотности набухающей почвы от приложенной нагрузки и влажности, определяющие энерго-массообмен почвы и атмосферы, а также выражение для характерного размера почвенного агрегата;

2. получены аналитические выражения для коэффициента распределения примеси в почвенной влаге и для зависимости коэффициентов диффузии и электрохимических параметров почвы от концентрации раствора;
3. выведены уравнения, описывающие формирование почвенного профиля и водопрочной агрегатной структуры;
4. установлены связи теплофизических параметров почвы с основными физико-структурными характеристиками почвы, прежде всего с влажностью и со способностью почвы к набуханию;
5. получена зависимость коэффициента теплоусвоения от основных физико-структурных характеристик почвы, и их влияние на суточный и годовой ход температуры почвы, а также на энерго-массообмен между почвой и турбулентной атмосферой в целом.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Храмченков М.Г. Физико-химия и механика процессов набухания в почвах / М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова // *Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации*: сб. ст. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – С. 260–262.
2. Кринари Г.А. Динамика и структурные пределы формирования надмолекулярных органно-минеральных комплексов. / Г.А. Кринари, М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.А. Шинкарев, К.Г. Гиниятуллин // *Структура и динамика молекулярных систем*: сб. ст. – Казань: Изд-во КГУ, 2003. – Часть 3. – С. 110–116.
3. Кринари Г.А. Минералогические и реологические подходы к агрегации почв. / Г.А. Кринари, М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.А. Шинкарев, К.Г. Гиниятуллин // *Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации*: сб. ст. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – С. 19–24.
4. Храмченков М.Г. Математическая модель усадки набухающего почвенного слоя / М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.Н. Чекалин // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов*. – 2004. – № 3. – С. 72– 5.
5. Лыгина Т.З. Физико-химические аспекты формирования и роль глино-металло-органического комплекса в процессе почвенного агрегатообразования / Т.З. Лыгина, Т.А. Романова, Р.Х. Храмченкова, М.Г. Храмченков // *Структура и*

динамика молекулярных систем: сб. ст. – Казань: Изд-во КГУ, 2004. – Часть 1. – С. 372–377.

6. Khramchenkov M.G. Swelling's model: non-elasticity and scaling / M.G. Khramchenkov, R.Kh. Khramchenkova // EURO Conference on Rock Physics and Geomechanics, September 20-23, 2004.: Abs. – Potsdam, 2004. – p.72–74.

7. Хра́мченков М.Г. Введение в физико-химическую механику почв / М.Г. Хра́мченков, Р.Х. Хра́мченкова – Казань: Изд-во Казан. мат. об-ва, 2005. – 100 с.

8. Лыгина Т.З. Электрохимические свойства почв и грунтов / Т.З. Лыгина, Р.Х. Хра́мченкова, М.Г. Хра́мченков // Разведка и охрана недр. – 2005. – №8.– С. 50–54.

9. Хра́мченкова Р.Х. Влияние физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и нижней атмосферы / Р.Х. Хра́мченкова, М.Г. Хра́мченков, А.Н. Фахрутдинова. – Препринт ПМФ – Казань: Изд-во Казан. мат-го об-ва, 2006. – 01. – 25с.

10. Хра́мченков М.Г. Теоретические основы гидрофизики набухающих почв / М.Г. Хра́мченков, Р.Х. Хра́мченкова // Георесурсы. – 2006. – №1 (18),– С. 17–20.

11. Хра́мченкова Р.Х. Гидрофизические свойства и атмосферная функция почв / Р.Х. Хра́мченкова, М.Г. Хра́мченков, А.Н. Фахрутдинова, А.Н. Чекалин // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006, – №2 (в печати).