

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. О.Г. Бакунина на диссертационную работу Матвеева Леонида Владимировича «Неклассические процессы переноса в сильно неоднородных средах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Неклассические (аномальные) процессы переноса исследуются достаточно давно. Так, в теории переноса скалярной примеси полем турбулентности одной из первых попыток моделировать аномальный, с точки зрения классической диффузии, эксперимент, стало использование Б.И.Давыдовым телеграфного уравнения. Это уравнение содержит вторую производную по времени, что наряду с диффузионным членом позволяет моделировать квази-баллистический перенос. В дальнейшем, интенсивно развивались модели, основанные на идее турбулентного каскада Колмогорова и Обухова. Шел поиск соответствующих различным условиям характерных корреляционных масштабов и времен. В дальнейшем теоретико-вероятностные соображения привели к необходимости рассмотрения негауссовских процессов. Так, идеи Хинчина получили развитие в работах Лифшица, использующего концепцию «оптимальной» флуктуации и Чирикова, указавшего на аномальное поведение «времен возврата». Тем не менее, интерес к развитию моделей аномального переноса не ослабевает, причем список областей, в которых они наблюдаются, неуклонно растет. В настоящее время проблемы, связанные с неклассическим переносом, актуальны для физики плазмы, астрофизики, физики полупроводников, турбулентности, гидрогеологии. Большой интерес данные процессы представляют и при исследовании задач переноса в сильно неоднородных геологических формациях. Этот интерес определяется двумя факторами. С одной стороны, геологические формации представляют собой крайне неоднородные среды, причем масштабы неоднородностей могут изменяться в широких пределах, от микроскопических размеров, до масштабов области наблюдения. Это чрезвычайно затрудняет, а то и делает вовсе невозможным описание на основе «средних» характеристик среды, таких как средняя пористость, проницаемость, коэффициент дисперсии, и требует развития новых моделей.

С другой стороны, знание закономерностей переноса в сильно неоднородных геологических средах необходимо для решения одной из фундаментальных проблем атомной энергетики – адекватного описания переноса радионуклидов при обосновании надежности и безопасности глубоких подземных захоронений радиоактивных отходов. Все это делает тему диссертации **актуальной** как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Ранее, при моделировании неклассических процессов переноса в сильно неоднородных неупорядоченных средах, как правило, использовались модели случайного блуждания частиц, когда последние совершают последовательные скачки различной длины и длительности. Применительно к переносу в сильно неоднородных средах, такой подход соответствовал бы учету скачков, длина которых существенно превосходит масштабы отдельных неоднородностей, составляющих среду. Автор демонстрирует в работе свой широкий научный кругозор, упоминая при этом все основные классические работы в списке литературы. **Новизна** подхода, использованного в диссертации, состоит в следующем. При построении модели автор исходит из того, что на масштабах отдельных макро неоднородностей перенос осуществляется по стандартным физическим механизмам – молекулярной диффузии и адвекции в поле скоростей грунтовых вод. На масштабах, включающих большое число областей, перенос определяется миграцией частиц по

отдельным областям и обменом примесью между соседними областями. Такой физический способ моделирования позволяет учитывать в явном виде характер распределения неоднородностей, вариацию их свойств, а также включать в рассмотрение и другие физические процессы, как например, адсорбцию на поверхности каналов, по которым происходит перенос, а также адсорбцию на подвижных коллоидных частицах.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения.

В первой главе проанализирована модель регулярно неоднородной резко контрастной среды, состоящей из двух областей – хорошо проницаемой области, имеющей форму плоскопараллельного слоя, либо цилиндра, и слабопроницаемой области, заполняющей остальную часть пространства. Рассмотрены две постановки задачи. В первой постановке механизм переноса в обеих областях является классическая диффузия, причем коэффициент диффузии в первой области значительно превосходит коэффициент диффузии во второй. Во второй постановке перенос по первой области определяется наряду с диффузией также дрейфом с постоянной скоростью. Самосогласованный учет блужданий частиц примеси в обеих областях приводит к тому, что существует большой интервал времени, в котором дисперсия вдоль хорошо проницаемой области растет со временем по субдиффузионному закону – корневому для плоскопараллельного слоя, и логарифмическому для цилиндра. Со временем, по мере того, как вклад областей в процесс переноса меняется (частицы все больше времени проводят в слабопроницаемой среде), меняется также и режим переноса. На малых временах перенос описывается классической диффузией с параметрами хорошо проницаемой области, в промежуточном интервале имеет место субдиффузионный режим, и на больших временах – режим классической медленной диффузии. Основным новым результатом этой главы состоит в том, что убывание концентрации на больших расстояниях (много больше размеров области локализации основного количества примеси) происходит по экспоненциальному закону, причем при смене режимов переноса в основном облаке, меняется вид экспоненты – «хвост» концентрации становится многоступенчатым.

Вторая, третья и четвертая главы посвящены развитию теории переноса, определяемого случайной адвекцией в средах с фрактальными свойствами. В таких средах течение сильно флуктуирует и имеют место дальнодействующие корреляции флуктуаций, так что корреляторы скорости убывают по степенному закону. При определенных значениях степени пространственного убывания перенос растворенной примеси определяется супердиффузией. Во второй главе развита модель переноса для изотропных фрактальных сред с конечным радиусом корреляции. Автор показал, что режим переноса в таких средах меняется со временем. В течение первого временного интервала имеет место режим супердиффузии (как и в средах с бесконечным радиусом корреляции). На больших временах супердиффузия сменяется классической диффузией. Приводятся значения времени перехода от одного режима к другому и эффективный коэффициент диффузии на больших временах. Рассчитано поведение (двухступенчатое) концентрации на асимптотически больших расстояниях. В этой же главе показано, что наличие динамических флуктуаций в рассмотренных средах не приводит к изменению характеристик переноса. В конце главы приведено сравнение выводов модели случайной адвекции с данными полевых наблюдений и показано хорошее совпадение предсказаний теории и эксперимента.

В третьей главе развита теория случайной адвекции в анизотропных фрактальных средах. Рассмотрен случай одноосной анизотропии, определяемой наличием вектора силы тяжести, либо градиента напора. В этом случае убывание коррелятора скорости описывается двумя индексами, и в зависимости от соотношения между ними поведение примеси может быть различным. В одном случае, при умеренной анизотропии (в работе выписан критерий) перенос во всех направлениях будет супердиффузионным (хотя и с различными скейлингами в продольном и поперечном направлениях). В другом случае,

при сильной анизотропии, вдоль оси имеет место супердиффузия, а в поперечной плоскости – классическая диффузия. Вдоль оси имеет место также аномальный дрейф, при котором среднее смещение частиц растет со временем по супердиффузионному закону. Приведен расчет поведения концентрации на асимптотически больших расстояниях. Все хвосты имеют не гауссовый вид.

В четвертой главе проведено фрактальное обобщение двупористой модели. В рамках развитой модели перенос определяется как адвекцией по сетке каналов, имеющей фрактальную структуру, так и наличием слабопроницаемых областей («ловушек»), проницаемость которых пренебрежимо мала, но которые также насыщены влагой, и, следовательно, примесь может диффундировать в них. Данная модель предназначена для описания переноса в перколяционных средах, примером которых могут являться трещиновато пористые среды. В главе показано, что в такой среде имеет место четыре временных интервала, и рассчитаны соответствующие им режимы переноса.

Пятая глава посвящена развитию неравновесной модели статистически однородных резко контрастных сред. По сравнению с классическими моделями двойной пористости здесь автор учел неоднородность распределения мигрирующей примеси в слабопроницаемых зонах на микро масштабах, которая может сохраняться на достаточно больших (в применении к переносу в геологических средах) временах. В результате в течение этих времен перенос характеризуется неклассическими режимами (субдиффузионным и/или квазидиффузионным). Интересно, что на поздних временах, когда можно считать равновесие между сильно и слабо проницаемыми подсистемами почти установившимся, предсказания развитой в диссертации модели отличаются от предсказания классической двупористой модели. Отличие состоит в выражении для эффективного коэффициента продольной дисперсии.

В шестой главе разработана модель коллоидно-усиленного переноса в сильно контрастных средах. Рассмотрены регулярно неоднородные, фрактальные и статистически однородные среды. Показано, что наличие массообмена, обусловленного способностью коллоидов адсорбировать растворенную примесь приводит к существенному подавлению действия на перенос примеси ловушек (влияние которых на перенос в контрастных средах было рассмотрено в первой, четвертой и пятой главах). Причиной этого является достаточно большие размеры коллоидных частиц, препятствующие их уходу из системы каналов, по которым просачивается жидкость, в окружающую матрицу с порами малого размера (слабопроницаемую подсистему). В итоге в течение достаточно большого интервала времени вся примесь переносится вместе с коллоидами, и только на больших временах происходит перерастворение примеси и ее окончательный уход в слабопроницаемую подсистему. Определены возможные режимы переноса в зависимости от соотношения между параметрами, описывающими как свойства контрастной среды, так и характеристики коллоидов и их взаимодействия с примесью. Используемые в модели параметры могут быть определены на практике.

В седьмой главе рассматривается перенос примеси по системам замкнутых конвективных ячеек, возникающих как результат конвективной неустойчивости в слое жидкости подогреваемой снизу. Как известно, при достаточно больших числах Рэлея в таких слоях возникают периодические структуры в виде одномерной цепочки роллов, либо двумерной решетки гексагональных ячеек. Растворенная примесь, попадая на границу слоя, сравнительно быстро переносится течением на масштабах ячейки. Дальнейшая миграция примеси обуславливается ее диффузией из одной ячейки в соседнюю. Это возможно лишь из области узкого погранслоя, ширина которого определяется временем прохождения частицы примеси вдоль границы двух ячеек. На основе учета этих процессов, а также возможности ухода примеси вглубь ячейки построена модель, сходная с развитыми в предыдущих главах моделями двойной пористости. Показано, что для цепочки роллов существует характерное время, так что на малых временах перенос происходит в режиме субдиффузии, а на больших временах – в

режиме классической диффузии с эффективным коэффициентом, определяемым как молекулярной диффузией, так и параметрами течения. Для решетки гексагональных ячеек на основе аналогичных рассуждений предложен эффективный коэффициент диффузии на больших временах. Также предложены выражения для эффективных коэффициентов диффузии в диапазоне чисел Рэлея, когда течения в ячейках становятся флуктуирующими, оставаясь замкнутыми в среднем по времени. Сравнение с экспериментальными данными подтвердило полученную зависимость от амплитуды флуктуаций скорости эффективного коэффициента диффузии для цепочки роллов.

Результаты автора являются **достоверными**, поскольку основаны на самых современных методах теоретической и математической физики.

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы для построения общей теории переноса в геологических средах. На основе установленных в диссертации закономерностей могут быть проведены оценки надежности захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях. Полученные результаты могут быть применены как для тестирования, так и для создания, различных численных кодов, предназначенных для моделирования процессов переноса примеси в контрастных средах.

Наряду с кропотливой диаграммной техникой, автор широко использует наглядные феноменологические модели. Это, безусловно, является достоинством работы. Хорошо известно, что идеи скейлинга для описания аномального переноса, использованные Обуховым, Зельдовичем, Корсином, Сэфманом и, конечно, Дыхне послужили отправной точкой для создания новых научных направлений. Здесь важно отметить, что лежащие в основе таких моделей теоретико-вероятностные идеи являются применимыми не только для описания переноса скаляра, но и находят в последствии применение в физической кинетике. Так, хорошо известная уже в начале 20-го века идея классической диффузии в конфигурационном пространстве была перенесена в 30-е годы Б.И.Давыдовым в фазовое пространство для описания кинетики электронов в плазме. А еще через несколько лет Зельдович применил диффузионную модель для описания роста кластеров. В теории аномального переноса ситуация полностью аналогична. Модели аномальной диффузии скаляра в поле турбулентности были применены Заславским в задачах, связанных с описанием функции распределения частиц в пространстве скоростей и стали широко использоваться в теоретических моделях коагуляции. Уверен, что предложенные в диссертации подходы также имеют потенциал развития.

По диссертационной работе имеются следующие замечания

1. В главах 3, 4, 5 для описания переноса в перколяционных средах вводятся индексы, характеризующие поле скоростей течения, свойства ловушек. Представляет интерес обсудить связь этих параметров с реальными свойствами среды, или способы их определения на практике.
2. В модели коллоидно-усиленного переноса предполагается, что движение коллоидов происходит со скоростью течения, хотя существует много факторов, которые могут привести к нарушению этого предположения, как-то прилипание и отлипание коллоидов к/от стенок, влияние неоднородности апертуры каналов на движение коллоидов, взаимодействие коллоидов со свободной поверхностью жидкости. Можно ли оценить влияние данных факторов на результаты модели?

Сделанные замечания, однако, никак не сказываются, на общей высокой оценке работы.

Основные результаты диссертации опубликованы как в ведущих научных отечественных журналах (ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ), так и зарубежных журналах и представлены на престижных международных конференциях.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. Текст автореферата демонстрирует профессионализм автора, который сумел в небольшом объеме не только представить свои результаты, но и ясно изложить основные идеи и использованные в работе методы.

Диссертация Л.В. Матвеева является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация Матвеева Л.В. соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, установленным в разделе II (пп. 9-14) «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (области исследований I) и отрасли науки «физико-математические науки», а сам Матвеев Л.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Бакунин Олег Геннадьевич

д.ф.-м.н., по специальности 01.04.08-физика плазмы
Ведущий научный сотрудник Курчатовского ядерно - технологического комплекса

НИЦ «Курчатовский институт»
Тел.+8 (499) 196-78-15
e-mail: Bakunin_OG@nrcki.ru

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» О.Г. Бакунина заверяю
Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» С.Ф. М.П.



 С.Ю. Стремоухов

Адрес:
Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)
123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1
Телефон: +7(499) 196-95-39
e-mail: nrcki.ru@nrcki.ru

06.06.2016г.