

Бог Вседержитель на престоле с грозно поднятой рукой:

— Noli turba circulos meos!¹

Внизу мириады звезд, миров, движущихся по сферам. И Прометей, напрягающий мышцы, чтобы разорвать круг человеческого бытия. И кто-то, сорвавшийся с круга и бешено упadaющий в хаос. И грозный, предостерегающий Перст Вседержителя:

— Noil turba circulos meos!

Из книги Леонида Андреева «S. O. S.»

В механике смысл моделирования реальных тел и явлений с помощью изобретаемых в науке объектов и процессов всем ясен, и все мы хорошо понимаем в этих случаях смысл наших действий. Не принято говорить о том, что «наукой открыты» идеальная несжимаемая жидкость, или абсолютно твердое тело, или идеальное упругое тело. Мы понимаем, что эти объекты — весьма нужные нам и полезные научные изобретения.

Из книги академика Л. И. Седова
«Размышления о науке и об ученых»

Турбулентное движение представляется как очень сложное движение в открытых системах, возникающее из менее упорядоченного движения — «физического хаоса»... Процесс перехода от ламинарного состояния к турбулентному можно считать примером процесса самоорганизации в нелинейной открытой системе.

Из книги Ю. Л. Климонтовича
«Введение в физику открытых систем»

¹ «Не мешайте моим кругам» — изречение Архимеда.

*Академику
Леониду Ивановичу Седову
посвящается*

Предисловие

В книге известного французского ученого Дэвида Рюэля «Случайность и хаос» есть примечательные слова: «Механика родилась из стремления объяснить мир». Справедливость этого высказывания, обращенного к истории науки, приобретает новый глубокий смысл на современном этапе развития естествознания, когда не только происходит симбиоз и тесное переплетение различных дисциплин, но и выявляются фундаментальные основы познания природных закономерностей, носителем которых традиционно служит механика вместе с ее отдельными направлениями и многочисленными приложениями. В частности, классические законы сохранения и формулируемые на их основе дифференциальные уравнения движения, в том числе движения небесных тел, уравнения механики сплошной среды, динамики разреженных многокомпонентных газов и физической кинетики, представляют собой основу разработки разнообразных физических, геофизических и астрофизических моделей, призванных не только объяснить окружающий мир, но и понять истоки его зарождения и эволюции.

Лавинообразный характер накопления знаний о Вселенной, стремительное расширение представлений об окружающих областях пространства вблизи Земли и далеко за ее пределами, обусловленные в первую очередь развитием космических исследований, привели к более глубокому проникновению в физическую сущность процессов и явлений, происходящих в разнообразных природных и космических средах при различных состояниях составляющей их материи. Это вызвало к жизни создание все более усложненных математических моделей подобных сред, чему способствовал громадный прогресс в создании методов математического моделирования и мощных вычислительных комплексов — их архитектуры, производительности и программного обеспечения. На этом пути открываются поистине необозримые возможности познания природы, с которыми связаны перспективы постановок и решения сложных многомерных нестационарных задач гео- и астрофизики и анализа эволюционных процессов на основе проведения широкомасштабных численных экспериментов.

Турбулентность принадлежит к числу весьма распространенных и, вместе с тем, наиболее сложных явлений природы, связанных с возникновением и развитием громадного числа вихрей всевозможных масштабов (организо-

ванных вихревых структур) при определенных режимах движения жидкости в существенно нелинейной гидродинамической системе. При потере устойчивости ламинарного течения, определяемой критическим значением числа Рейнольдса, в гидродинамической системе возникает нестационарное пульсационное течение, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение пульсаций скорости и других термогидродинамических параметров в интервале длин волн от минимальных, определяемых диссипативными (вязкими) силами, до максимальных, определяемых границами течения. На условия возникновения завихренности и структурирования развитой турбулентности оказывают влияние как физические свойства среды, такие как молекулярные коэффициенты переноса, с которыми связаны процессы диссипации энергии в турбулентном потоке, так и условия на границе, где наблюдаются тонкие пограничные вихревые слои, неустойчивость которых проявляется в порождении ими вихревых трубок. Турбулизация приводит к быстрому перемешиванию частиц сплошной среды и повышению эффективности переноса массы, импульса и тепла, а в многофазных многокомпонентных средах — также способствует ускорению протекания фазовых переходов и химических реакций. По мере накопления знаний о разнообразных природных объектах, в которых турбулентность играет существенную, а во многих случаях определяющую роль, моделирование этого явления и связанных с ним гидродинамических эффектов приобретает ключевое значение. Вместе с тем, прямое численное моделирование турбулентных течений сопряжено с большими математическими трудностями, а построение общей теории структурированной турбулентности сжимаемой жидкости, из-за сложности механизмов взаимодействия разномасштабных вихревых структур, вряд ли возможно.

В основу монографии положены исследования авторов по ряду направлений космических исследований, природных явлений и по проблемам феноменологического моделирования развитой турбулентности в многокомпонентных смесях реагирующих газов и в гетерогенных газопылевых средах. К ним привело, прежде всего, изучение природных механизмов эволюции Земли и планет Солнечной системы, аккреционных газопылевых протопланетных дисков, изучение процессов турбулентного тепло- и массопереноса в верхних атмосферах планет — разреженных газовых оболочках небесных тел, лежащих в пограничных областях между плотными слоями атмосферы и околопланетным космическим пространством. Исследование турбулентных течений в газовой и газопылевой среде с усложненными физико-химическими характеристиками, при математическом моделировании которых следует учитывать сжимаемость потока, переменность теплофизических свойств, наличие процессов тепло- и массопереноса, химических реакций и излучения, а также воздействие гравитационных и электромагнитных сил, составляет основной предмет настоящей монографии. Возникающие при этом дополнительные механические эффекты не позволяют, в общем случае, использовать результаты, полученные в рамках традиционного описания турбулентных течений однородной несжимаемой жидкости, используемые, например, в метеорологии. В связи с этим, при изучении природных сред подобного рода, необходима разработка новых подходов к моделированию турбулентности, адекватно описы-

вающих гидродинамические движения сжимаемых смесей, процессы переноса и химическую кинетику в пульсирующем многофазном многокомпонентном континууме. В силу сложности гидродинамической и физико-химической картины турбулентного движения теоретические подходы к решению данной проблемы должны быть по своему характеру «полуэмпирическими».

В монографии упор делается на термодинамическом конструировании континуальных моделей турбулизованных природных сред в космическом пространстве, на основе которых можно, в частности, решать задачи образования и эволюции разнообразных астрофизических и геофизических объектов. К ним относятся в первую очередь модели турбулентных движений многокомпонентных химически активных газов с учетом диффузии, теплопередачи и вязкости и процессов излучения, модели турбулентных движений газовзвесей и различного рода гетерогенных сред с фазовыми переходами, модели структурированных турбулентных течений и турбулентных течений, взаимодействующих с электромагнитным полем.

Книга посвящена, в частности, чрезвычайно злободневной проблеме самоорганизации в природных средах и в первую очередь в развитых турбулентных течениях, что служит отражением наиболее общей концепции соотношения порядка и хаоса в природных процессах. Вынося свой труд на суд специалистов в различных областях знаний, авторы осознают, что развиваемый ими подход является в некоторых аспектах нетрадиционным для механиков, руководствующихся «классическими» мерками. В связи с этим представляет определенный интерес история нового понимания «турбулентности». Впервые публичное обсуждение вопроса об относительной степени упорядоченности ламинарного и турбулентного движений происходило, по-видимому, во время международной конференции «Synergetics 83» в городе Пущино под Москвой. В докладе Ю. Л. Климонтовича был сформулирован общий критерий — так называемая « S -теорема» (к которому мы еще вернемся), характеризующий относительную степень упорядоченности состояний открытых диссипативных систем. Этот критерий был использован докладчиком для количественного доказательства утверждения о большей упорядоченности турбулентного движения по сравнению с ламинарным. Приверженцев этой точки зрения в зале нашлось совсем немного. Среди них были И. Пригожин, Г. Хакен и В. Эбелинг. Любопытно, что во время этого доклада известный гидромеханик Г. И. Баренблатт открыто возмущался: «Все механики прекрасно знают, что турбулентное движение является более хаотическим».

И тем не менее, вопреки традиционной точки зрения механиков на турбулентность, в последнее десятилетие благодаря прогрессивному развитию методов визуального наблюдения турбулизованных течений жидкости было открыто большое число разнообразных вихревых когерентных структур (КС) и надежно установлены их топологические характеристики. В качестве примеров могут быть названы «вихри Тейлора», «турбулентные пятна», «вихревые кольца», «вихревые клубки», «шпилькообразные вихри», «берстинги», «вихревые спирали», «стрики», «структуры Брауна—Томаса», «грибовидные вихри» и т. п. Частота появления той или иной структуры зависит от типа течения (пограничный слой, слой смешения, струя и т. п.), геометрии и режима

движения турбулизованной жидкости. Важно выяснить, каким образом могут возникать когерентные структуры подобного рода. Частично на этот вопрос отвечает нелинейная неравновесная термодинамика, принципы которой широко используются в монографии.

Отличительная особенность проведенных авторами исследований заключается в предложенном стохастико-термодинамическом подходе к построению полуэмпирических моделей турбулентности реагирующих многокомпонентных газов, газопылевых сред и структурированной турбулентности однородной жидкости. Основная направленность этих исследований связана с решением ряда сложных современных проблем астрофизики и геофизики, исходя из методов механики сплошных сред. Развитые подходы имеют непосредственное отношение к моделированию механизмов, формирующих свойства астрофизических и геофизических объектов на разных стадиях их эволюции, исследованию проблем звездной и планетной космогонии, включая образование протопланетных газопылевых аккреционных дисков и последующую аккумуляцию планетных систем, ранние этапы эволюции планет, формирование и эволюцию планетных и кометных атмосфер, а также к привлекающим все большее внимание проблемам экологии, связанных с диффузией загрязнений и охраной окружающей природной среды.

Общая структура книги включает девять глав. Для удобства читателя в Приложении приведены элементы тензорного исчисления. Мы попытались сделать главы книги по возможности независимыми друг от друга, хотя их, естественно, объединяет общая концептуальная направленность.

В *первой главе*, носящей вводный характер, кратко рассматриваются свойства турбулентных течений, элементы стохастической нелинейной динамики и соотношение порядка и хаоса, в том числе синергетические аспекты проблемы формирования упорядоченных структур. Обсуждаются основные представления о турбулентности как о динамической системе. Поскольку в монографии основное внимание уделяется турбулентным течениям природных неоднородных сред с переменной плотностью, то проблема моделирования таких сред приобретает совершенно новые грани. Классические представления о турбулентных движениях в несжимаемой жидкости переплетаются с другими областями механики, которые объединяют гидромеханику смеси, гетерогенную механику, термодинамику, теорию радиационного переноса и кинетику химических реакций. В дополнение к флуктуациям скорости, существенное значение приобретают флуктуации плотности, температуры и концентраций отдельных химических компонентов смеси. В результате мы сталкиваемся с одной из сложнейших проблем механики турбулизованных сред, заключающейся в необходимости полуэмпирического моделирования взаимосвязанных гидродинамических, физико-химических и радиационных процессов и явлений в турбулентном течении.

С позиций стохастической динамики и теории самоорганизации в открытых нелинейных диссипативных системах обсуждается возможность возникновения упорядоченностей в космической среде и при эволюции космических объектов. В качестве примеров рассмотрены вопросы динамической астрономии, динамика Солнечной системы, особенности природы галактик, звезд,

планет и малых тел Солнечной системы, вопросы звездно-планетной эволюции, включая формирование аккреционных протопланетных дисков, некоторые проблемы строения и эволюции Вселенной. Это обсуждение, выходящее далеко за рамки более узких проблем турбулентности, которым посвящена монография, служит, с одной стороны, задаче дать примеры упорядоченностей, исходя из современных представлений о космосе и природе населяющих его объектов, а с другой — задаче отразить общность концепции макромолекулярного структурообразования в космических и других природных средах.

Вторая глава, посвященная формулировке общих законов баланса массы, количества движения и энергии в многокомпонентной химически активной газовой смеси, также носит вспомогательный характер и используется в качестве основы для более детального рассмотрения проблем турбулентности, предложенных в последующих разделах монографии. Как известно, наиболее полное и строгое математическое описание многокомпонентной среды в случае регулярного (ламинарного) течения может быть проведено в рамках кинетической теории многокомпонентных смесей многоатомных ионизованных газов. Исходной служит система обобщенных интегро-дифференциальных уравнений Больцмана для функций распределения частиц каждого сорта смеси (с правыми частями, содержащими интегралы столкновений и интегралы реакций), дополненная уравнением переноса радиации и уравнениями Максвелла для электромагнитных полей. Такой подход развит, в частности, в монографии авторов (*Маров, Колесниченко, 1987*), где для получения системы дифференциальных газокинетических уравнений реагирующей смеси применен обобщенный метод Чепмена—Энскога. Наряду с этим, с точки зрения макроскопических свойств, такую многокомпонентную газовую смесь (например, верхнюю атмосферу планеты) можно рассматривать как континуальную среду и для ее адекватного описания воспользоваться методами континуальной механики смесей, позволяющими, исходя из принципов неравновесной термодинамики, получить систему гидродинамических уравнений со всеми необходимыми замыкающими соотношениями. Подобный феноменологический подход позволяет также, при использовании расширенной необратимой термодинамики, разработать полуэмпирические модели турбулентных течений реагирующих газовых сред.

Для изучения процессов переноса массы, импульса и энергии применен формализм классической неравновесной термодинамики, с помощью которого можно, как известно, описать широкий класс неравновесных процессов переноса в газах в полном соответствии с экспериментальными данными. Предложенная здесь методика термодинамического вывода обобщенных соотношений Стефана—Максвелла для многокомпонентной диффузии позволяет получить, в частности, целый ряд алгебраических соотношений для коэффициентов переноса, связывающих, например, термодиффузионные отношения с коэффициентами термодиффузии и многокомпонентной диффузии, истинный и парциальный коэффициенты теплопроводности, многокомпонентные и бинарные коэффициенты диффузии. Все соотношения подобного рода, выведенные нами термодинамическим путем, находятся в полном согласии с результатами газокинетической теории многокомпонентных смесей одно-

атомных газов, полученными в рамках второго приближения метода Чепмена—Энскога. Однако, в отличие от последнего, термодинамический подход не связан с постулированием конкретной микроскопической модели взаимодействия молекул исследуемой природной среды, что свидетельствует о его универсальном характере.

В *третьей главе* дан вывод замкнутой системы осредненных гидродинамических уравнений для турбулизованной многокомпонентной химически активной газовой смеси, предназначенной для описания широкого класса турбулентных движений и физико-химических процессов в природных средах. Проанализирован физический смысл отдельных членов этих уравнений, в том числе скоростей перехода энергии между различными составляющими энергетического баланса. Наряду с традиционным теоретико-вероятностным осреднением пульсирующих термогидродинамических параметров, здесь систематически использовано весовое (средневзвешенное) осреднение Фавра, позволяющее в значительной степени упростить запись и анализ осредненных уравнений движения химически активных газов с переменными теплофизическими свойствами. Оценивая в целом состояние проблемы замыкания первого порядка, следует признать, что до настоящего времени фактически не существовало общей феноменологической теории турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии для многокомпонентных реагирующих смесей. В связи с этим в этой главе нами рассмотрен термодинамический подход к решению проблемы замыкания осредненных гидродинамических уравнений смеси на уровне моделей турбулентности первого порядка, основанный на использовании методов расширенной необратимой термодинамики. Особое внимание уделено при этом выводу термодинамическими методами замыкающих градиентных соотношений для тензора турбулентных рейнольдсовых напряжений, а также турбулентных потоков тепла и диффузии в многокомпонентной смеси. Онзагеровский формализм позволяет и в этом случае получить наиболее общую структуру подобного рода соотношений, в том числе в виде обобщенных соотношений Стефана—Максвелла для многокомпонентной турбулентной диффузии. На рассматриваемом уровне замыкания эти соотношения наиболее полно описывают турбулентный тепломассоперенос в многокомпонентной среде. Для определения коэффициентов турбулентного обмена использованы как классические представления, восходящие к Прандтлю, Тейлору и Карману, так и более современные модели замыкания второго порядка, основанные, в частности, на дифференциальных уравнениях баланса для турбулентной энергии и интегрального масштаба турбулентности. Для удобства читателя все выкладки проведены весьма подробно и могут быть прослежены во всех деталях.

В *четвертой главе* рассмотрена проблема конструирования полуэмпирических моделей турбулентности второго приближения для многокомпонентной химически активной газовой смеси с переменной плотностью и переменными теплофизическими свойствами. Дан вывод замыкающих дифференциальных уравнений переноса для различных одноточечных (одновременных) вторых корреляционных моментов пульсирующих термогидродинамических параметров, входящих в осредненные гидродинамические уравнения реаги-

рующей смеси масштаба среднего движения. Для химически активной среды проблема замыкания в общем случае сильно усложняется из-за необходимости осреднения нелинейных «источниковых членов» производства вещества в химических реакциях, имеющих экспоненциальный характер. Поэтому нами предложена оригинальная процедура осреднения скоростей химических реакций любого порядка и намечена схема полуэмпирического моделирования этих дополнительных корреляций. При моделировании корреляций третьего порядка в уравнениях переноса используются аппроксимирующие выражения, содержащие универсальные эмпирические коэффициенты, которые нет необходимости подбирать заново для каждого нового течения. Следует подчеркнуть, что, несмотря на полуэмпирический характер этих дополнительных уравнений, основанные на них инвариантные модели полностью развитой турбулентности химически активных газов обладают достаточной гибкостью. В частности, они позволяют учесть воздействие механизмов конвекции, диффузии, возникновения, перераспределения и диссипации стохастических турбулентных характеристик поля пульсирующих термогидродинамических параметров на пространственно-временное распределение осредненных термогидродинамических параметров среды. Развитый нами подход нашел широкое применение при численном моделировании реальных режимов течения реагирующей турбулизованной жидкости, для которых существенно влияние предистории потока на характеристики турбулентности в точке. С другой стороны, он использован для вывода более точных алгебраических соотношений для коэффициентов турбулентного переноса в течениях многокомпонентной смеси с поперечным сдвигом (в том числе применительно к специфике моделирования природных сред), что нашло отражение в данной главе книги.

Пятая глава посвящена разработке феноменологической модели развитой турбулентности в сжимаемой однородной среде с учетом происходящих в ней нелинейных кооперативных процессов. Исходной концепцией служит представление турбулизованного движения жидкости в виде термодинамического комплекса, состоящего из двух континуумов — подсистемы осредненного движения и подсистемы турбулентного хаоса, рассматриваемого, в свою очередь, как конгломерат вихревых структур различных пространственно-временных масштабов. Развиваются представления о неравновесно-стационарном состоянии диссипативно активной подсистемы турбулентного хаоса, возникающем вследствие притока негэнтропии от внешней среды (подсистемы осредненного движения) и появлении в системе относительно устойчивых когерентных вихревых структур при изменении параметров, управляющих режимом течения. Это позволяет рассматривать некоторые процессы перестройки турбулентного поля как процессы самоорганизации в открытой системе. Методами стохастической теории необратимых процессов и расширенной необратимой термодинамики получены определяющие соотношения для турбулентных потоков и сил, которые замыкают систему осредненных гидродинамических уравнений и с достаточной для практики полнотой описывают процессы переноса и самоорганизации в неравновесно-стационарном случае.

Развитый нами оригинальный подход стохастико-термогидродинамического моделирования подсистемы турбулентного хаоса основан на введении в мо-

дель набора случайных величин — пульсирующих внутренних координат (типа скоростей диссипации турбулентной энергии, собственных завихренностей поля пульсаций скорости, относящихся к мезомасштабным вихревым образованиям и т. п.), характеризующих структуру и временную эволюцию флуктуирующего поля гидродинамических параметров течения. Это дает возможность термодинамическими методами смоделировать каскадный процесс Ричардсона—Колмогорова и вывести также кинетические уравнения Фоккера—Планка—Колмогорова (ФПК), предназначенные для описания эволюции функции распределения вероятности мелкомасштабных характеристик турбулентности. Эти уравнения служат, в частности, основой при анализе марковских диффузионных процессов перехода в пространстве внутренних координат из одного стационарно-неравновесного состояния в другое в результате последовательной потери устойчивости (росте надкритичности) подсистемой турбулентного хаоса, далекого от полного хаоса термодинамического равновесия. Подобные переходы могут быть описаны как неравновесные «фазовые переходы второго рода» в вихревом континууме, в результате чего внутренние координаты в бифуркационных точках меняются скачкообразно.

Здесь же рассмотрен альтернативный метод к исследованию механизмов подобного перехода, основанный на стохастических уравнениях ланжевеновского типа, тесно связанных с выведенными кинетическими уравнениями ФПК. Проанализирована кардинальная проблема развиваемого подхода — возможность существования асимптотически устойчивых стационарно-неравновесных состояний подсистемы турбулентного хаоса. Предложен неравновесный термодинамический потенциал для стохастических внутренних координат турбулентного хаоса, обобщающий известное соотношение Больцмана—Планка для равновесных состояний на стационарно-неравновесные состояния представляющего хаос ансамбля, и показано, что этот потенциал является функцией Ляпунова для стационарно-неравновесных состояний ансамбля, отвечающего подсистеме турбулентного хаоса.

Последний, третий, параграф этой главы посвящен термодинамическому выводу обобщенных дробных уравнений ФПК, описывающих процессы эволюции внутренних координат подсистемы турбулентного хаоса на основе дробной динамики. Введение дробных производных по времени в кинетическое уравнение ФПК позволяет учесть в контексте единого математического формализма эффекты перемежаемости во времени, с которой обычно связывают наличие турбулентных всплесков на фоне менее интенсивных низкочастотных колебаний фоновой турбулентности.

В *шестой главе* доказана так называемая *H-теорема* для энтропии Кульбака, из которой следует, что при известных предположениях всякое начальное распределение вероятностей внутренних координат подсистемы турбулентного хаоса по истечении достаточно большого времени асимптотически стремится к определенному стационарному состоянию. Здесь продемонстрирована принципиальная возможность самоорганизации в термодинамически открытой подсистеме турбулентного хаоса (т. е. возникновения упорядоченных диссипативных структур, обладающих более низкой симметрией, чем исходное состояние), когда в процессе временной эволюции квазиравновесной

вихревой подсистемы возможно генерирование когерентных структур, связанное с эффектом неравновесных фазовых переходов, индуцированных мультипликативным шумом в системе хаоса. Показано, что если интенсивность мультипликативного шума хаоса достаточно велика, то экстремумы плотности вероятности, описывающей стационарное поведение стохастической вихревой системы и по числу, и по положению существенно отличаются от стационарных состояний соответствующей детерминированной системы. Более того, мультипликативный шум может приводить к возникновению новых стационарных состояний и тем самым изменять и сами свойства (в частности, бифуркационные диаграммы) локальной устойчивости хаоса: точки перехода могут сдвигаться под влиянием интенсивного шума в турбулентной жидкости.

Исходя из общей концепции рождения когерентных вихревых структур в термодинамически открытой подсистеме турбулентного хаоса (вследствие индуцированных мультипликативным шумом хаоса неравновесных фазовых переходов), в этой главе рассмотрен также один из конкретных механизмов формирования и эволюции мезомасштабных вихревых структур, связанный с явлением фазово-частотной синхронизации автоколебаний той части внутренних координат, которая относится к когерентной составляющей хаоса. Кроме этого, изучены некоторые сценарии динамического влияния некогерентной составляющей (мелкозернистого флуктуационного поля) турбулентного хаоса на образование и эволюцию вихревых структур. Показана взаимосвязь подобных переходов с процессом самоорганизации кластеров, обладающих более низкой симметрией, чем исходное состояние. В частности, сделан важный вывод о том, что, в то время как в классической турбулентности рост размеров твердых частиц при столкновениях затруднен, внутри подобных диссипативных упорядоченностей может, наоборот, происходить их объединение и укрупнение. Другими словами, возникновение вихревых кластеров облегчает, например, решение кардинальной проблемы эволюции аккреционных дисков — проблемы укрупнения твердых частиц за счет соударений даже при относительно небольших скоростях, что встречает очевидные затруднения при попытках воспроизведения аналогичных процессов в лабораторных экспериментах, о чем говорится в главе 1.

В *седьмой главе* наше внимание сосредоточено на одной из фундаментальных проблем геофизики и астрофизики — формировании протопланетных аккреционных дисков у звезд поздних спектральных классов, частным случаем которых является происхождение Солнечной системы. Особое внимание уделено разработке полуэмпирического подхода к моделированию гетерогенной турбулентности в аккреционном диске, окружавшем прото-Солнце на ранней стадии его существования, с целью уменьшения допущений в используемых моделях. Сформулирована полная система уравнений двухфазной многокомпонентной механики с учетом относительного движения фаз, процессов коагуляции, фазовых переходов, химических реакций и излучения. Она предназначена для схематизированных постановок и численного решения конкретных модельных задач по взаимосогласованному моделированию структуры, динамики, теплового режима и химического состава околосолнечного диска на разных этапах его эволюции. Процессы в дисковой среде рассматривают-

ся при наличии развитых турбулентных движений коагулирующей газозвеси, способствующих в рамках данной модели формированию пылевого субдиска, возникновению в нем гидродинамической и затем гравитационной неустойчивости, с последующим образованием пылевых кластеров.

С целью адекватного феноменологического описания турбулентных течений вещества газопылевого диска, проведено теоретико-вероятностное осреднение по Фавру стохастических уравнений гетерогенной механики и получены определяющие градиентные соотношения для турбулентных потоков межфазной диффузии и тепла, а также для тензоров «относительных» и рейнольдсовых напряжений, необходимые для замыкания гидродинамических уравнений масштаба среднего движения. Исследовано влияние инерционных эффектов пылевых частиц на характеристики турбулентности в диске, в частности, на дополнительную генерацию турбулентной энергии крупными частицами в окрестности экваториальной плоскости прото-Солнца. Предложен полуэмпирический способ моделирования коэффициента турбулентной вязкости в двухфазной дисковой среде с учетом обратных эффектов переноса диспергированной фазы и тепла на развитие турбулентности с целью моделирования неоднородной по высоте термогидродинамической структуры субдиска и окружающего его газа.

Для установившегося режима движения при осаждении твердых частиц к центральной плоскости диска под действием ускорения силы тяжести исследован параметрический метод моментов решения интегро-дифференциального уравнения коагуляции Смолуховского для функции распределения частиц по размерам, который базируется на априорной принадлежности искомой функции распределения к определенному параметрическому классу распределений. Наряду с этим, проанализирован возможный «режим предельного насыщения» атмосферы субдиска мелкодисперсными частицами пыли, благодаря которому интенсифицируются различные механизмы коагуляции в турбулизованной среде. Результаты этой главы открывают возможности создания усовершенствованных (и более приближенных к реальности) моделей звездно-планетной космогонии, обеспечивая тем самым новый подход в решении фундаментальной проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы и планетных систем у других звезд.

В *восьмой главе* исследована проблема гидродинамической спиральности и, в частности, влияние спиральности на эволюцию дисковой турбулентности. В ней показано, что относительно длительное затухание турбулентности в диске связано с отсутствием отражательной симметрии (относительно экваториальной плоскости) анизотропного поля турбулентных скоростей. Сформулирована концепция возникновения энергоемких мезомасштабных когерентных вихревых структур в термодинамически открытой подсистеме турбулентного хаоса, связанная с реализацией обратного каскада кинетической энергии в зеркально-несимметричной дисковой турбулентности. Показано, что вследствие энерговыделения обратный каскад порождает иерархическую систему уплотнений вещества с фрактальным распределением плотности, инициирующих, в конечном счете, механизмы триггерного кластерообразования. В свою очередь, образование вихревых сгущений приводит к интенсификации

механических и физико-химических взаимодействий между частицами вещества, в результате чего возможно самопроизвольное возникновение и рост пылевых кластеров, стимуляция процессов конденсации и фазовых переходов, процессов тепло- и массообмена между различными областями дисковой гетерогенной среды и существенная модификация спектра колебаний (волн плотности). Обсуждаются влияние спиральности на энергетический каскад во вращающемся диске и отрицательная вязкость (порождаемая каскадом спиральности в дисковой турбулентности, когда осуществляется инверсный перенос энергии от малых вихрей к более крупным), для описания которой используется феноменологический подход. Приведены соотношения сдвиговой и вращательной вязкости в турбулентном диске.

Наконец, в заключительной *девятой главе*, также применительно в основном к проблеме звездно-планетной космогонии, рассмотрена проблема реконструирования эволюции допланетного газопылевого облака с учетом электродинамических эффектов. В приближении одножидкостной магнитной гидродинамики получена замкнутая система магнитогидродинамических уравнений масштаба среднего движения, предназначенная для моделирования сдвиговых и конвективных турбулентных течений электропроводных сред в присутствии магнитного поля. Эти уравнения могут использоваться для численного решения задач по взаимосогласованному моделированию мощных турбулентных течений космической плазмы в аккреционных дисках и в связанных с ними коронах, в которых магнитное поле существенно влияет на динамику происходящих астрофизических процессов. При разработке модели проводящей турбулизованной среды, наряду с традиционным теоретико-вероятностным осреднением МГД уравнений, систематически использовано также весовое осреднение Фавра, позволяющее в значительной степени упростить запись осредненных уравнений движения для сжимаемой электропроводной жидкости и анализ механизмов усиления макроскопических полей турбулентными течениями. С целью наглядного физического истолкования отдельных составляющих энергетического баланса плазмы и поля, получены различные уравнения энергии, позволяющие проследить возможные переходы энергии из одной формы в другую, в частности, понять механизмы перекачки гравитационной и кинетической энергии среднего движения в магнитную энергию.

Особое внимание уделено методу получения в рамках расширенной необратимой термодинамики замыкающих соотношений для полного (с учетом магнитного поля) кинетического тензора турбулентных напряжений в электропроводной среде и турбулентной электродвижущей силы (магнитного тензора Рейнольдса), что позволяет проанализировать также ограничения, накладываемые условием возрастания энтропии на коэффициенты турбулентного переноса. Предложена методика моделирования коэффициентов турбулентного переноса, в частности, коэффициента кинематической турбулентной вязкости, позволяющая учитывать влияние магнитного поля и обратного эффекта переноса тепла на развитие турбулентности в дифференциально вращающемся электропроводном аккреционном диске.

Из приведенного краткого обсуждения содержания исследований, которым посвящена монография, с очевидностью следует ее четкая направленность на

решение проблем, традиционно относимых к сфере интересов астрофизики и геофизики, методами механики. Оставляя в стороне дискуссионный вопрос относительно весьма искусственного деления науки на «разделы» и «направления», заметим лишь, что достоинства и преимущества выбранного подхода оправданы, если они обеспечивают разработку моделей, наиболее полно и адекватно отражающих изучаемую природную среду. Это в полной мере относится к космическим объектам, не доступным прямым методам исследований, и проблемам их эволюции, таким, например, как газопылевые турбулизированные аккреционные диски в качестве основы формирования планетных систем. Исходя из этих соображений, предлагаемую вниманию читателя монографию можно рассматривать как теоретическую основу для численного моделирования широкого класса явлений, в которых определяющую роль играет механика неоднородных (многокомпонентных, многофазных) и структурированных турбулентных сред, широко распространенных в природе. Еще раз подчеркнем, что существенной составной частью этих исследований является развиваемый авторами на протяжении многих лет принципиально новый стохастико-термодинамический подход к моделированию развитых турбулентных течений и структурированной турбулентности гео- и астрофизических систем, рассматриваемых с позиций стохастической динамики открытых диссипативных систем. Совершенно естественно поэтому, что исследование турбулентных течений на разных уровнях описания этого явления, как характерного примера неравновесности в нелинейной динамике, явилось тем стержнем, вокруг которого построено изложение в монографии.

Книга представляет собой совместный труд обоих авторов. Мы считаем необходимым отметить, что на ее написание, как и на наши собственные работы по проблемам механики космических природных сред, глубокое влияние оказали обсуждения ряда ключевых проблем с Леонидом Ивановичем Седовым. Многие его идеи по проблемам построения моделей сплошных сред с усложненными физико-химическими и тепловыми свойствами, в частности по проблемам моделирования многофазной многокомпонентной гидромеханики и многокомпонентных турбулентных сред, мы постарались отразить в настоящей монографии.

Материалы глав 2—9 целиком основаны на оригинальных исследованиях авторов, и результаты этих исследований используются в разрабатываемых ими совместно с коллегами и учениками численных моделях. Часть результатов была ранее опубликована в статьях, приведенных в списке литературы, и в монографиях: «Введение в планетную аэрономию» (М. : Наука, 1987); «Турбулентность многокомпонентных сред» (М. : Наука-Интерпериодика, 1998); «Mechanics of Turbulence of Multicomponent Gases» (ASSL series, v. 269, Dordrecht—Boston—London : Kluwer Academic Publishers, 2001) и «Astrophysical Discs» (Eds. A. M. Fridman, M. Ya. Marov, and I. G. Kovalenko, ASSL series, v. 337, Springer, 2006).

Авторы хорошо осознают, что далеко не все вопросы в той обширной проблематике, которой касается монография, им удалось осветить с одинаковой степенью полноты. Это в первую очередь связано с тем, что, несмотря на определенные успехи, достигнутые за последние годы в изучении столь сложной области, как турбулентность и, особенно, турбулентность неоднородных

сред и структурированная турбулентность, многое еще остается неясным, а возникающие математические трудности часто представляются непреодолимыми. Недостаточно также изучены и физико-химические характеристики космической среды, с которыми непосредственно связано наблюдаемое своеобразие аккреционных дисков, особенно их структурообразующие механизмы и эволюция, в том числе эволюция протопланетных систем, формирование специфических природных условий на планетах и их спутниках. Ключевую роль в понимании этих природных механизмов самоорганизации призвано сыграть, в частности, развитие теории структурированной турбулентности. Это своего рода вызов времени, ответы на который, по нашему мнению, могут быть получены лишь в рамках определенных ограничений.

В связи с этим, необходимы разработки новых оригинальных подходов, позволяющие эффективно моделировать турбулентную динамику при описании сложных явлений природы, в частности космических сред, и именно эту цель мы поставили перед собой в своих исследованиях. С подобной концепцией полностью солидарен известный американский ученый из Ливерморской лаборатории А. С. Buckingham, который в своей рецензии на упомянутую выше нашу книгу «Mechanics of Turbulence of Multicomponent Gases» отметил, что на данном этапе полезнее разрабатывать «...модель, позволяющую рассчитать, как турбулентность влияет на сопутствующие физические процессы, нежели сосредотачиваться на более глубоком понимании сути турбулентности — цели, которая при всей ее академической притягательности чревата потенциальными разочарованиями» (Appl. Mech. Rev. V. 56. No. 1. 2003).

Авторы надеются, что их новая книга будет с интересом встречена широким кругом специалистов в области астрофизики, геофизики, механики и космических исследований. Астрофизики, геофизики, планетологи найдут в ней достаточно глубокое обоснование с позиций механики теоретических подходов и методов математического моделирования турбулентности, используемых при описании различных природных и космических сред, в частности широко распространенных в космосе дисковых структур, а механики — новую быстро прогрессирующую область знаний и возможность приложения фундаментальных разделов этой науки к захватывающим перспективам проникновения в самые сокровенные тайны природы. Все критические замечания по содержанию книги будут приняты с благодарностью.

Написанию монографии и улучшению ее содержания способствовали многочисленные обсуждения затрагиваемых вопросов с нашими коллегами из разных организаций. Мы хотели бы, в первую очередь, выразить благодарность А. М. Фридману, Э. М. Галимову, А. Б. Макалкину, В. И. Марону, И. С. Веселовскому. Выражаем также признательность К. К. Мануйлову за помощь при подготовке электронной версии монографии. Публикация книги стала возможной благодаря финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 08-01-07033), за что авторы выражают свою признательность.

Январь 2008 г.

*А. В. Колесниченко,
М. Я. Маров*

Турбулентный хаос и самоорганизация в космических и природных средах

В монографии обсуждаются вопросы динамики природных объектов, в структуре которых в процессе эволюции может происходить внутренняя самоорганизация и из первоначальных хаотических движений возникают упорядоченности. Они могут быть подвержены временным и пространственным вариациям, либо сохранять устойчивость в течение длительного времени. Упорядоченные структуры повсеместно окружают нас на Земле, многочисленные примеры самоорганизации наблюдаются в космосе. В окружающем мире широко распространены турбулентные течения, которые характеризуются большим разнообразием динамических процессов. На проблемах макроскопического моделирования такого рода природных течений и будет, в основном, сосредоточено наше внимание.

Турбулентность представляет собой широко распространенное и чрезвычайно сложное физическое явление, связанное с пульсационным движением жидкости, которое присутствует в разнообразных технических системах и в природных средах. Характерными примерами турбулизованых космических природных сред являются атмосферы планет Солнечной системы, в том числе внешние газовые оболочки этих небесных тел, лежащие в пограничных областях между атмосферой и космосом. Развитая турбулентность играет также важную роль в формировании структуры и свойств астрофизических объектов — галактик и звезд на разных этапах эволюции, а также протопланетных облаков и аккреционных дисков, служащих основой космогонических моделей. Многочисленные экспериментальные исследования специфических особенностей турбулентных движений жидких и газообразных сред и ключевых механизмов, определяющих их природу, выполненные в настоящее время, создают необходимые предпосылки для разработки теоретических подходов с целью создания адекватных математических моделей данного явления.

Следует отметить, что, несмотря на более чем вековую историю развития, теория гидродинамической турбулентности все еще далека от своего завершения. Продолжают появляться все новые и новые статистические и феноменологические подходы к ее изучению. Растет число различных математических моделей, разработанных для лучшего понимания проблемы возникновения и эволюции турбулентных движений однородной жидкости (классическая теория турбулентности) и жидкостей с усложненными физико-химическими и тепловыми свойствами. Исходя из представлений о коэффициентах турбу-

лентного обмена для различных переносимых субстанций, развиваются многочисленные полуэмпирические (инженерные) модели турбулентности, предназначенные для решения практических задач на основе проведения широкомасштабных численных экспериментов. Познакомить читателя с некоторыми важными идеями, движущими этот прогресс, продемонстрировать возможности современных феноменологических подходов к моделированию гидродинамической турбулентности, в частности структурированной турбулентности, и отметить отдельные проблемы, пока не разрешенные, — вот задача, которую поставили перед собой авторы предлагаемой книги.

В этой главе, носящей вводный характер, обсуждаются базовые положения классической теории турбулентности однородной жидкости, а также структурные свойства турбулентного движения, позволяющие интерпретировать переход от ламинарного течения (менее упорядоченного) к турбулентному течению (более упорядоченному) как процесс самоорганизации в открытой диссипативной системе. Проанализированы возможные подходы к макроскопическому моделированию турбулентных движений, вопросы стохастической нелинейной динамики и соотношение турбулентности и хаоса, в том числе синергетические аспекты проблемы возникновения и эволюции упорядоченных вихревых структур в развитых турбулентных потоках. Наряду с этим, приведены примеры турбулизированных космических и природных сред, для которых, собственно, и сконструированы феноменологические модели, рассмотренные в монографии.

Одновременно, основываясь на элементах стохастической динамики, мы попытались дать общие представления о соотношениях упорядоченности и хаоса в динамических системах, характерными примерами которых служат разнообразные природные и космические среды. С целью лучшего понимания таких сред нам представлялось необходимым хотя бы вкратце познакомить читателя с космическим окружением собственной планеты и сформировавшимися на других небесных телах уникальными природными комплексами, многие из которых можно рассматривать как отражение процессов самоорганизации на длительном пути эволюции. Этой же цели, более тесно отвечающей исследуемой предметной области, служит подробное рассмотрение в гл. 7—9 оригинальных подходов к созданию моделей протопланетных аккреционных дисков, как одного из важнейших элементов эволюции звезд и газопылевых облаков, из которых формируются планетные системы. Комплексное моделирование таких сложных космических объектов, с учетом специфики процессов переноса в гетерогенных турбулентных средах, влияния магнитогидродинамических эффектов и космохимических ограничений, открывает перспективы получения ответов на самые фундаментальные вопросы космогонии и эволюции Вселенной.

§ 1.1. Турбулентное движение жидкости. Общие положения

Все течения сжимаемых жидкостей и газов делятся на два резко различных типа: спокойное и плавное течение, называемое ламинарным, и их противоположность — так называемые турбулентные течения, при которых гид-

родинамические и термодинамические характеристики жидкости (скорость, температура, давление, массовая плотность, концентрации химических компонентов, показатель преломления среды и т. д.) испытывают хаотические пульсации и потому крайне нерегулярно изменяются в пространстве и во времени. Многочисленные примеры записи флуктуаций (с разными периодами и амплитудами) термогидродинамических параметров, которыми изобилует специальная литература по турбулентности, иллюстрируют сложную внутреннюю структуру реальных турбулизованных течений, резко отличающихся в этом отношении от спокойных ламинарных течений. Благодаря образованию многочисленных вихрей всевозможных размеров, турбулентные течения обладают повышенной способностью к переносу количества движения, энергии и массы элементарных жидкостных объемов, что приводит как к увеличенному силовому воздействию на обтекаемые твердые тела, так и к интенсивным тепло- и массообмену между отдельными слоями течения, к ускоренному протеканию химических реакций и т. п. Турбулентный режим движения жидкости (внешне неупорядоченный) возникает при потере устойчивости ламинарного течения, когда безразмерное число Рейнольдса $Re = UL/\nu$ (где U и L — характерные скорость и линейный масштаб течения, ν — молекулярная кинематическая вязкость) превосходит некоторое критическое значение Re_{cr} . Безразмерное число Re , отражающее соотношение инерционных и вязких сил в потоке, является самой общей характеристикой турбулизованной жидкости. Турбулентные движения всегда диссипативны, поэтому они не могут поддерживаться сами по себе, а должны черпать энергию из окружающей среды. Возникновению турбулентного режима движения ламинарной жидкости обычно предшествует возбуждение колебаний одной или нескольких независимых частот f и их гармоник (иногда и субгармоник). Турбулентность возникает либо в результате роста малых возмущений в ламинарном потоке, либо вследствие конвективной неустойчивости движения. В первом случае энергия турбулентности извлекается из кинетической энергии крупномасштабных сдвиговых течений, во втором — из потенциальной энергии неравномерно нагретой жидкости в гравитационном поле.

Турбулизация движения является характерной особенностью многих природных явлений, в которых происходят гидродинамические процессы, сопровождаемые переносом массы, импульса и энергии. Всевозможные эффекты ее проявления наблюдаются на пространственно-временных масштабах от сантиметров до мегапарсеков. Таковы, например, разнообразные гидродинамические процессы в земной атмосфере и гидросфере, в атмосферах и недрах звезд и планет, в межзвездных газопылевых облаках (планетарных туманностях и протопланетных дисках), в галактической и межгалактической средах, в космической плазме (магнитогидродинамическая, или плазменная турбулентность). Преимущественно турбулентными являются метеорологические процессы, включающие взаимодействие океана с атмосферой, испарение с водных поверхностей, вертикальный и горизонтальный перенос тепла и интенсивное перемешивание примесей (в том числе загрязнений). Турбулентность возникает также во многих технических устройствах при движении жидкости, газа или плазмы, в частности в пограничных слоях и спутных сле-

дах при обтекании твердых тел, в струйных течениях и в слоях смешения, в течениях в каналах и трубах, при вихревом возбуждении колебаний механических и акустических колебательных систем (так называемые эоловые тона), в плазменных пучках и т. д.

1.1.1. Физическая природа турбулентности и сценарии ее возникновения

Сделаем, прежде всего, несколько общих замечаний о физической природе турбулентности, возникающей при определенных условиях в нелинейной диссипативной жидкой или газообразной среде с очень большим числом степеней свободы, которая может обмениваться с окружающей средой энергией. При наличии турбулентности в жидкости возбужденным всегда оказывается огромное число степеней свободы, в результате чего изменение во времени и пространстве любой гидродинамической величины описывается функциями, содержащими громадное число компонент Фурье, т. е. имеющими очень сложный характер. Именно по этой причине каждая индивидуальная жидкая частица (т. е. малый элемент объема жидкости, содержащий очень большое число молекул) такой системы движется внешне сложным, запутанным образом, так что ее координаты и направление движения изменяются со временем по законам стохастической механики. Корреляции скорости в любой точке потока ограничены при этом малыми временными интервалами, зависящими от начальных условий, за пределами которых невозможно установить причинную связь между полем скоростей в различные моменты времени, в том числе корреляцию с предшествующим движением. Все это подкрепляет представление о стохастическом характере пульсаций скорости и других физических параметров в турбулентном потоке, которые возникают как результат потери устойчивости ламинарного движения гидродинамической системы при изменении внешних управляющих параметров (например, числа Re). С этой точки зрения турбулентное движение является более хаотическим, чем ламинарное, т. е. турбулентность отождествляется с хаосом.

В более общем смысле турбулилизацию движения жидкости или газа можно представить как результат изменения топологии фазовых траекторий, приводящего к перестройке аттракторов и качественному изменению (бифуркации) состояния движения в фазовом пространстве. Отражением стохастической природы турбулентности служит полное перемешивание фазовых траекторий с различным асимптотическим поведением и структурой (топологией) окружающих их областей притяжения (аттракторов). Признаком перемешивания является быстрое затухание корреляционных функций на больших временах и непрерывность частотных спектров. Такое поведение траекторий в фазовом пространстве означает, что система обладает эргодичностью, то есть почти для всех реализаций случайного поля временные средние равны соответствующим статистическим средним

$$\langle \mathcal{A}(\mathbf{r}) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathcal{A}(\mathbf{r}, t) dt, \quad (1.1.1)$$

[. . .]