

Моделирование когерентных структур (топологических солитонов) в закрытых помещениях путем численного решения уравнений гидродинамики

В.В. Носов, В.П. Лукин, Е.В. Носов, А.В. Торгаев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 31.10.2014 г.

Проведено моделирование когерентных структур (трехмерных топологических солитонов) путем численного решения уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса) в закрытых помещениях, без обмена веществом среды через границы. Приведены результаты решения восьми краевых задач: павильон спектрографа и подкупольное помещение крупных астрономических телескопов: Большого солнечного вакуумного телескопа и Большого телескопа альт-азимутального (БСВТ и БТА), кубическое помещение, плоская квадратная ювета, труба квадратного сечения, пристеночная турбулентность (термики), купол (полусфера с вязкой средой), открытое пространство над одним нагретым пятном. Показано, что внутри помещений наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры или топологические солитоны). В случае одинаковых краевых условий картины движений, полученные численным моделированием и независимо зарегистрированные авторами ранее экспериментально (в воздухе помещений БСВТ и БТА), практически совпадают. Совпадают также картины движения сред внутри других закрытых объемов, полученные нами численным моделированием и экспериментально зарегистрированные ранее в работах других авторов.

Численные расчеты подтверждают сформулированный ранее нами экспериментальный вывод, что смешивание многих когерентных структур с разными близкими размерами (и с близкими частотами главных вихрей) дает некогерентную колмогоровскую турбулентность. Кроме того, достаточно протяженные инерционные интервалы спектра с колмогоровским $5/3$ -степенным убыванием наблюдаются в средах с большой вязкостью.

Ключевые слова: турбулентность, когерентная турбулентность, когерентная структура, топологический солитон, численное моделирование когерентных структур, уравнения гидродинамики, уравнения Навье–Стокса, топологический предвестник; turbulence, coherent turbulence, coherent structure, topological soliton, simulation of coherent structures, hydrodynamics equations, Navier–Stokes equations, topological precursor.

Введение

Как известно, экспериментальные данные измерений параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях свидетельствуют о существовании в турбулентной атмосфере детерминированных образований — когерентных структур.

А.С. Монин и А.М. Яглом [1] определяют когерентную структуру как неслучайную нелинейную устойчивую суперпозицию крупномасштабных компонент турбулентности. Однако процесс распада гидродинамической ячейки, как установлено в наших работах [2–8], продолжается до самых мелких вихрей, которые могут существовать в воздухе. Поэтому в [6–10] понятие «когерентная структура» расширено. Гидродинамической когерентной структурой называется компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную вихревую струк-

туру (ячейку), возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. В расширенном понимании когерентная структура есть солитонное решение уравнений гидродинамики (топологический трехмерный солитон, уединенная волна). Это либо односолитонное решение, либо один солитон в многосолитонном решении. Когерентная структура содержит как крупномасштабную, так и мелкомасштабную турбулентность. Турбулентность, возникающая в результате распада главного вихря, является когерентной и детерминированной [2–10].

Перечислим кратко установленные нами ранее свойства одиночных когерентных структур и свойства смесей (сумм) различных когерентных структур.

Свойства одиночных когерентных структур указаны и детально рассмотрены в наших статьях [2–10]. Характеристики одиночной когерентной структуры исследовались нами экспериментально (малогабаритным акустическим датчиком) с последующим теоретическим анализом экспериментальных спектров флуктуаций случайной температуры и компонент скорости.

* Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Евгений Викторович Носов (nev@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru).

Свойства смесей (сумм) различных когерентных структур детально рассмотрены и изучены в наших статьях [11–28]. В результате многолетних (более 10 лет) экспедиционных измерений в различных климатических условиях и регионах с горной и ровной поверхностью нами накоплена обширная экспериментальная база данных приземных характеристик атмосферной турбулентности. Измерения проводились в Байкальской астрофизической обсерватории, Саянской солнечной обсерватории, в горах Колыванского хребта, в горах Северного Кавказа и др. В атмосфере обычно наблюдаются когерентные структуры с главными вихрями разных размеров. Поэтому атмосферу можно рассматривать как среду, удобную для исследования характеристик смесей различных когерентных структур. Накопленные экспериментальные данные обрабатывались также с применением методов спектрального анализа случайных процессов.

1. Свойства когерентных структур

1.1. Свойства одиночных когерентных структур

1. В результате действия термодинамических градиентов (температуры или давления) на границах некоторого выделенного объема в жидкой среде возникает пространственная вихревая структура (ячейка, энергонесущий вихрь). Таких ячеек может быть одна или много. Ячейки представляют собой результат трансформации энергетических возмущений на границах объема в движение жидкой среды. В нашем расширенном определении одна такая (обычно долгоживущая) ячейка вместе с продуктами дискретного когерентного каскадного распада самой этой ячейки называется когерентной структурой [2–10].

2. Распадающуюся пространственную структуру, представляющую собой главный энергонесущий вихрь, можно назвать порождающей ячейкой (структурой). Частота когерентно распадающегося главного вихря (порождающей ячейки) является основным признаком когерентной структуры [2–10].

3. Размеры когерентной структуры нечеткие. Течения, внешние по отношению к главному вихрю, могут переносить продукты его распада на значительные расстояния, образуя длинный турбулентный след [8–10].

4. Время жизни когерентной структуры определяется временем действия термодинамических градиентов (градиентов температуры и давления) [2, 6, 8–14].

5. Как предельный случай сильной устойчивости когерентная структура может состоять только из одной долгоживущей порождающей структуры. Тогда порождающая структура представляет собой некоторую конфигурацию ламинарного течения (не распадающийся топологический солитон) [6, 8].

6. В конвективной когерентной структуре, возникающей в закрытом помещении, подтверждаются все основные сценарии возникновения турбулентности из ламинарных течений [2–8] (сценарии стохастизации Ландау–Хопфа, Рюэлля–Такенса, Помо–

Манневилля, Фейгенбаума [1]). Главным сценарием является сценарий Фейгенбаума.

7. Распад главного энергонесущего вихря конвективной когерентной структуры осуществляется по сценарию Фейгенбаума. Главный вихрь в ячейке распадается на более мелкие в результате серии бифуркаций удвоения периода (в атмосфере – около 10 бифуркаций). Возникающая в результате турбулентность является когерентной и детерминированной [2–8].

8. Спектр пассивной примеси (температуры) в распадающейся ячейке фрактален (локально самоподобен) [2–8].

9. Турбулентность, возникающая в когерентной структуре, как показано в наших работах [2–8], удовлетворяет всем признакам, характеризующим появление хаоса в типичных динамических системах. К этим признакам обычно относятся: возникновение нерегулярных долгоживущих пространственных структур, вид (характер) которых определяется диссипативными факторами, локальную неустойчивость и фрактальность фазового пространства таких структур, появление центрального (на нулевой частоте) пика в спектре. При этом центральный пик в спектре возникает, как установлено нами в [2, 3, 6, 8]), за счет нестационарности случайных процессов в когерентной структуре.

10. Известные процессы перехода ламинарных течений в турбулентные (конвекция Рэлея–Бенара, обтекание жидкостью препятствий и др.) можно считать процессами образования либо одиночных когерентных структур, либо сумм различных когерентных структур [2–8, 10, 15, 19].

11. Когерентная структура содержит как крупномасштабную, так и мелкомасштабную турбулентность. При этом одномерный спектр турбулентности (компонент скорости и температуры) имеет более быстрое убывание в инерционном интервале (обычно $8/3$ -степенное убывание, которое в высокочастотной части инерционного интервала переходит в еще более сильное $12/3$ -убывание) по сравнению с колмогоровским $5/3$ -степенным убыванием [2–8].

12. Внешний масштаб турбулентности в одиночной когерентной структуре можно считать продуктом первого акта распада когерентно распадающегося главного вихря [2–8].

1.2. Свойства смесей (сумм) различных когерентных структур

1. В одной когерентной структуре продукты ее распада образуют семейство вихрей, синфазных (когерентных) главному вихрю. В атмосфере обычно имеются разные когерентные структуры, у которых частоты главных вихрей неодинаковы (некратны, несоизмеримы). При смешивании таких разных когерентных структур элементы одного семейства будут несинфазны (некогерентны) элементам другого семейства. Поэтому турбулентность, возникающую при смешивании когерентных структур с главными вихрями разных размеров, естественно назвать некогерентной.

2. Турбулентность, наблюдаемая в одной когерентной структуре (когерентная турбулентность),

отличается от некогерентной колмогоровской более быстрым убыванием одномерного спектра турбулентности в инерционном интервале (обычно $8/3$ -степенное убывание вместо $5/3$ -колмогоровского убывания) и меньшим вкладом мелкомасштабных компонент [9–17].

3. Любой спектр турбулентности в атмосфере (для температуры и компонент скорости) представляется в виде суммы спектров разных когерентных структур с той же интенсивностью турбулентности, но имеющих разные размеры главных вихрей (различные внешние масштабы турбулентности). Поэтому турбулентность в открытой атмосфере можно рассматривать как сумму различных когерентных структур [18–21], имеющих разные размеры. Следовательно, реальною атмосферную турбулентность можно считать некогерентной смесью (суммой) различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей.

4. При одинаковой интенсивности турбулентности кривая, соответствующая инерционному интервалу одномерного спектра колмогоровской турбулентности, является верхней огибающей суммы одномерных спектров разных когерентных структур, имеющих различные размеры главных энергонесущих вихрей (разные внешние масштабы) [18–21].

5. Если в рассматриваемой области среды разница между размерами главных вихрей разных когерентных структур невелика (не более 2–8 раз), то сумма спектров разных когерентных структур практически не отличается от колмогоровской зависимости. Если же эта разница велика (более 20–30 раз), то сумма спектров имеет глубокий провал, в котором «обнажается» спектр одной самой крупной структуры с $8/3$ -степенным убыванием. Турбулентность в этой области в таком случае называется когерентной [18–21].

6. Если в рассматриваемой области среды когерентные структуры имеют разные, но близкие размеры (отличающиеся не более чем в 2–8 раз) и расположены сравнительно недалеко друг от друга («хорошо смешаны»), то наблюдается локальная изотропия турбулентности, описываемая колмогоровским спектром. Если же одна из когерентных структур существенно больше других (или же структуры значительно удалены друг от друга), то наблюдается анизотропия турбулентности, описываемая спектром турбулентности в одной когерентной структуре (спектр когерентной турбулентности) [18–21].

7. При обтекании препятствий вследствие постоянной генерации крупных ячеек и переноса продуктов их распада внешним течением течения сразу за препятствиями обеднены мелкими вихрями. Поэтому сразу за препятствием спектр флуктуаций соответствует когерентной турбулентности. С увеличением расстояния от препятствия вихри (являющиеся продуктами распада) из турбулентных следов распадающихся когерентных структур смешиваются с окружающей турбулентной атмосферой и турбулентность из когерентной постепенно переходит в колмогоровскую [10, 15, 19].

8. Системы порождающих ячеек-структур (системы солитонов, представляющих собой главные энерго-

несущие вихри) могут принимать различные формы: от уединенной упорядоченной структуры типа тороидальной ячейки Бенара или произвольного осесимметричного вихря до систем периодически распределенных в пространстве гидродинамических возмущений типа систем разнообразных валов и др. [1, 2, 28].

9. Размеры порождающих ячеек в атмосфере могут отличаться друг от друга в сотни миллионов раз: от нескольких сантиметров (пристеночная турбулентность, термки) до нескольких тысяч километров (ячейки Ферреля и Гаддея – ячейки общей циркуляции атмосферы) [1, 2, 28].

10. Интересным случаем долгоживущей системы крупных порождающих ячеек в атмосфере можно считать циклоны и антициклоны (осесимметричные вихри с разными направлениями вращения, достаточно сложной внутренней структурой и размерами от 100 до 2000 км). Поодиночке они обычно не возникают, чаще образуют устойчивые четверки. Четверка устойчива именно из-за разных направлений вращения, так как в области соприкосновения циклона и антициклона воздух движется в одном направлении и давление здесь уменьшается. Внешнее давление стягивает их друг к другу. Образуется устойчивая структура – четырехсолитонное решение уравнений гидродинамики. Разрушение циклона или антициклона происходит в течение нескольких суток и приводит к существенному усилению турбулентности в регионе. Об этом летчиков обычно предупреждают диспетчерские службы аэропортов [21].

11. Когерентная турбулентность есть основная причина значительных отклонений постоянных Колмогорова и Обухова от своих стандартных значений. Это приводит к большому (до 100%) погрешностям в основанных на законе Колмогорова–Обухова измерениях характеристик турбулентности [16].

12. Другим источником ошибок в измерениях характеристик турбулентности служат структурные функции (флуктуаций температуры и компонент скорости). Нами показано, что по сравнению с колмогоровской турбулентностью в структурной функции температуры удлиняется начальный квадратический интервал (внутренний масштаб турбулентности в когерентной структуре на порядок больше колмогоровского), укорачивается инерционный $2/3$ -интервал (который проявляется лишь приблизительно), появляется дополнительный коэффициент. Поэтому в измерениях из $2/3$ -асимптотики структурной функции интенсивность когерентной турбулентности будет завышенной более чем в 2 раза [17].

13. В когерентной турбулентности по сравнению с колмогоровской происходит ослабление фазовых флуктуаций оптического излучения (вследствие обедненности мелкомасштабными неоднородностями). Поэтому с целью повышения качества изображений для установки наземных астрономических телескопов можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений имеются области когерентной турбулентности [22–25].

14. Обедненность когерентной турбулентности мелкомасштабными неоднородностями (по сравнению с колмогоровской турбулентностью) приводит также к уменьшению (почти в 2 раза) интегральной ин-

тенсивности атмосферной когерентной турбулентности (интеграл по всем высотам от высотного профиля интенсивности турбулентности) [26, 27].

15. В высокогорных обсерваториях при переносе ветром сформировавшихся в атмосфере областей неколмогоровской когерентной турбулентности наблюдается неколмогоровский эффект перемежаемости дрожания астрономических изображений. Эффект заключается в периодическом ослаблении и усилении фазовых флуктуаций оптического излучения и обусловлен наличием большого числа областей когерентной турбулентности с наветренной стороны (и их последующим ветровым переносом) [28].

Таким образом, из вышеперечисленных свойств как одиночных когерентных структур, так и смесей (сумм) различных когерентных структур следует, что когерентную структуру (в расширенном определении), несмотря на ее сложное внутреннее строение, можно рассматривать как основной базисный структурный элемент или как элементарные частицы, из которых состоит турбулентность. Этот основной результат наших исследований турбулентности детально обсуждается в работах [18–21].

В наших работах [6, 8] сделан обзор опубликованных в мировой научной литературе результатов изучения свойств когерентных структур. Сравнение установленных нами (и перечисленных выше) свойств структур с известными результатами показывает, что наши данные значительно расширяют существующие в настоящее время в мировой научной литературе представления о когерентных структурах.

Как уже было отмечено, свойства когерентных структур были установлены нами путем обработки накопленных экспериментальных данных методами спектрального анализа случайных процессов с последующим формированием логических выводов. Однако эти методы не дают возможности увидеть сами когерентные структуры и их смеси. Такая возможность увидеть когерентные структуры (визуализировать линиями тока) впервые реализована в настоящей статье.

1.3. Программное обеспечение

Когерентная структура соответствует уединенному солитонному решению уравнений гидродинамики – уравнений Навье–Стокса:

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nu \Delta \mathbf{u} - \rho^{-1} \nabla p + \mathbf{f}; \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{u} – скорость; t – время; p – давление; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность; \mathbf{f} – ускорения сторонних сил.

Решение указанных уравнений позволяет моделировать когерентные структуры. Это делает возможным дальнейшее исследование свойств турбулентности, которая образуется различными когерентными структурами [18, 19, 21]. Предварительное моделирование когерентных структур необходимо также на этапе планирования экспериментов по исследованию характеристик турбулентности.

Аналитическое решение уравнений Навье–Стокса вследствие их нелинейности является сложной задачей, поэтому для решения подобных задач обычно применяются численные методы. В связи с появлением в последнее время достаточно быстрых и доступных компьютеров численное решение уравнений гидродинамики стало возможным с удовлетворительной точностью в приемлемые сроки.

Одной из целей нашей работы является моделирование когерентных структур в закрытых помещениях путем численного решения уравнений гидродинамики. Под закрытым помещением здесь понимается замкнутое пространство (комната, павильон, купол, кювета и т.п.) без обмена веществом среды на границах в отсутствие внешнего ветра. Указанную задачу гидродинамики стало возможно численно решить с помощью специализированных пакетов свободного программного обеспечения, имеющихся в настоящее время.

Нами использовано The Gerris Flow Solver [29, 30] – свободное программное обеспечение (ПО) для решения уравнений в частных производных, описывающих задачи гидродинамики. Программное обеспечение разработано Stéphane Popinet [29, 30] и распространяется в открытых исходных кодах свободно и бесплатно.

Краткое резюме основных возможностей ПО [29]: ПО решает зависящие от времени с переменной плотностью уравнения Эйлера, Стокса или Навье–Стокса; решает линейные и нелинейные уравнения мелкой воды; адаптивно изменяет расчетную сетку: изменяет разрешение в соответствии с градиентными особенностями течения; полностью автоматически генерирует сетку в сложной геометрии; имеет второй порядок точности по пространству и времени; позволяет использовать неограниченное количество пассивных индикаторов переноса/диффузии и гибко задавать дополнительные источниковые члены; поддерживает параллелизацию вычислений с использованием библиотеки MPI; динамически распределяет нагрузку; поддерживает независимую автономную визуализацию; реализует схему переноса метода объема жидкости для соприкасающихся межфазных потоков и точную модель поверхностного натяжения; решает задачи многофазной электрогидродинамики.

Эффективность и требуемая точность программного обеспечения [29] проверены и подтверждены на достаточно широком классе 100 типичных тестовых задач [30–32], решение которых дает удовлетворительные результаты.

Программное обеспечение [29] решает систему (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho [\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}] &= \nabla (2\mu \mathbf{D}) - \nabla p + \sigma \kappa \delta_s \mathbf{n} + \rho \mathbf{g}; \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0; \\ \partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость; \mathbf{D} – тензор деформации $D_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) / 2$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; κ – кривизна поверхности; δ_s – дельта-функция поверхности; \mathbf{n} – нормаль к поверхности; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Далее рассмотрим краевые задачи для некоторых выделенных объемов, которые могут содержать в себе сегменты оптических трасс как внутри (разд. 2–7), так и снаружи астрономических телескопов (разд. 8). Исследование внутренней структуры движений нагретой среды в таких объемах необходимо для оценок характеристик распространяющегося в объеме оптического излучения.

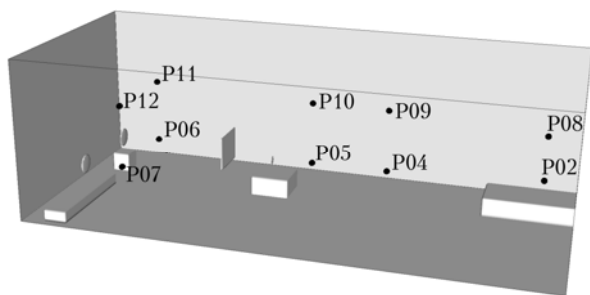
2. Павильон спектрографа Большого солнечного вакуумного телескопа

2.1. Краевая задача

Для выполнения численного эксперимента нами сформулирована краевая задача, в качестве граничных условий которой использованы результаты натурных измерений [2–4]. Эти измерения проводились нами в нескольких экспедициях по изучению астроклимата Сибири, в частности результаты измерений в павильоне спектрографа Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), расположенного в пос. Листвянка, Иркутская обл. (рис. 1, а). Краевая задача соответствует условиям реального эксперимента в БСВТ.



а



б

Рис. 1. Большой солнечный вакуумный телескоп (а); модель павильона спектрографа со схемой расположения точек измерения параметров (б). Вид спереди справа сверху

Модель павильона спектрографа (рис. 1, б) имеет размеры, соответствующие реальным размерам павильона (ш × в × г): 16 × 5 × 7 м.

Граничные условия Дирихле: температура $T_{\min} = 285,1^\circ$, $T_{\max} = 287,15^\circ$; $T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\text{левая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\min}$; $T_{\text{правая стенка}} = T_1(\mathbf{r})$,

$T_{\text{нижняя стенка}} = T_2(\mathbf{r})$, $T_{1,2}(\mathbf{r})$ — экспериментально измеренные [2–4] распределения температуры; $T_{\text{твердые тела}} = T_{\text{нижняя стенка}}(\mathbf{r})$, где твердые тела — бетонные основания зеркал, подставки, столы, блоки; скорости на границах объема $U = V = W = 0$ (U — x -компонента скорости; V — y -компонента; W — z -компонента).

Начальные условия: $T_0 = T_{\min}$; давление $P_0 = 94643$ Па (710 мм рт. ст.). Измеренные температурные градиенты: $\nabla T_{\text{вертикальный}} = 0,41$ град/м, $\nabla T_{\text{горизонтальный}} = 0,028$ град/м. Внутри павильона подобная воздуху среда: кинематическая вязкость $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$ м²/с; плотность $\rho = 1$ кг/м³.

2.2. Эксперимент и моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха в павильоне спектрографа БСВТ в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления.

Из сравнения данных рис. 2 и 3 (цв. вклейки) видно, что в вертикальной плоскости, расположенной в центре павильона спектрографа БСВТ, картина движения воздуха, полученная в результате численного моделирования (рис. 3), практически совпадает с ранее экспериментально [2–4] зарегистрированной приближенной картиной осредненных движений воздуха в этом же павильоне. Как видно из рис. 3 и 4 (цв. вклейки), внутри помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Совместно эти вихри можно интерпретировать как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом прямоугольном объеме.

2.3. Спектральный анализ

На рис. 5 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T в павильоне спектрографа (в точке P05).

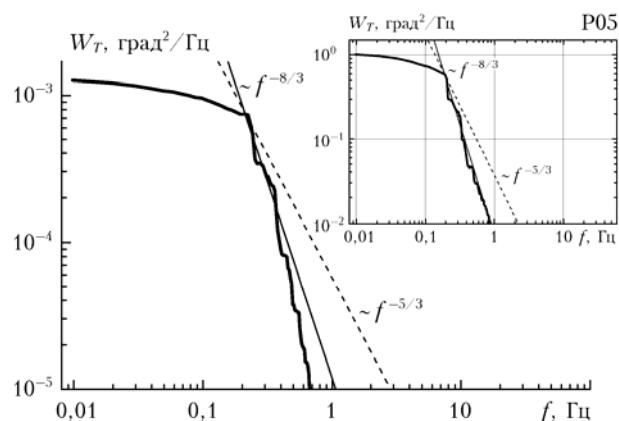


Рис. 5. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T . Моделирование. Справа сверху — экспериментальный спектр W_T [2–4]

Теоретический спектр оказывается практически таким же, как и ранее зарегистрированный экспе-

риментальный спектр [2–4]. Как и в [2–4], в каждой точке наблюдения расчетный спектр флуктуаций температуры в инерционном интервале имеет $8/3$ -степенное убывание (с последующим более быстрым $12/3$ -убыванием).

3. Купол Большого телескопа альт-азимутального

В период с 2012 по 2014 г. были выполнены экспериментальные исследования (постановка задачи, организация и проведение натурных измерений, анализ и обобщение результатов) дневного астроклимата специализированного (подкупольного) помещения Большого телескопа альт-азимутального (БТА, рис. 6, *a*), Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН), пос. Нижний Архыз Зеленчукского района, Карачаево-Черкесской республики, РФ (далее – эксперимент в БТА 2012 г.). Исследования проведены авторами настоящей статьи при содействии в выполнении измерений сотрудников САО РАН В.В. Власюка и Г.В. Якопова. Измерения проведены с 20 по 31 октября 2012 г. с использованием малогабаритной ультразвуковой метеостанции в разных точках по объему подкупольного пространства при закрытом и открытом состоянии щели купола. Дополнительно проведены длительные измерения (долговременные ряды наблюдений) с использованием метеостанции на 20-метровой метеовышке, находящейся на площадке вблизи БТА.

Результаты измерений показали, что в подкупольном пространстве БТА наблюдаются два крупных вихря с вертикальными осями и максимальными диаметрами около 16 м (рис. 6, *б*). В каждой точке измерений спектр флуктуаций температуры в инерционном интервале имеет $8/3$ -степенное убывание (с последующим более быстрым убыванием). Спектры становятся колмогоровскими ($5/3$ -степенное убывание) только при измерениях непосредственно в открытой щели телескопа. Параметры вихрей в БТА существенно отличаются от параметров в БСВТ. Например, средняя скорость движения воздуха внутри вихря на БТА [2–4] составляет около 1 м/с, а на БСВТ – около 0,1 м/с.

3.1. Краевая задача

Для проведения моделирования нами сформулирована следующая краевая задача, соответствующая условиям эксперимента в БТА.

Модель купола (рис. 7, *a*) имеет размеры ($\varnothing \times \text{в}$): $45,2 \times 22,6$ м. Граничные условия Дирихле: температура $T_{\min} = 293^\circ$; $T_{\max} = 300^\circ$; $T_{\text{поверхность купола}} = T(\theta)$ – распределение температуры; $T_{\text{основания}}$ – не задана ($T \sim$); $\theta = 60^\circ$ – зенитный угол Солнца в эксперименте; нулевые скорости на границах $U = V = W = 0$. Начальные условия: $T_0 = 290^\circ$; давление $P_0 = 94$ кПа. Внутри купола подобная воздуху среда: $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho = 1$ кг/м³. Модель купола внутри пуста, т.е. конструкции телескопа и другое оборудование отсутствуют.

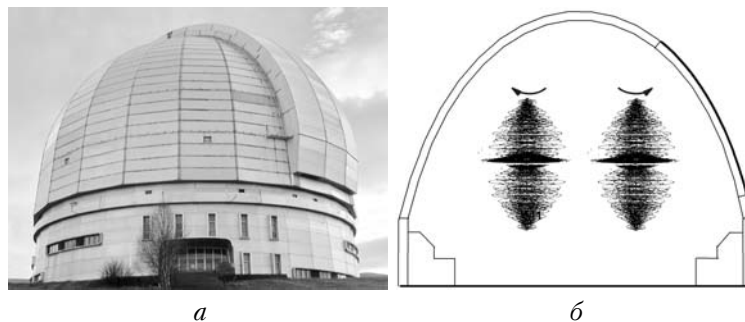


Рис. 6. Большой телескоп альт-азимутальный (*a*); экспериментально зарегистрированная приближенная картина движений воздуха в подкупольном пространстве БТА (эксперимент 2012 г.). Два воздушных вихря с вертикально ориентированными осями и противоположными вращениями. Вид сбоку (*б*)

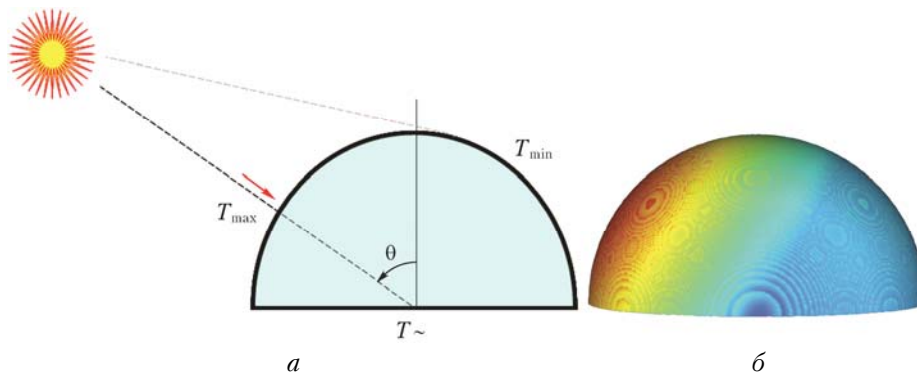


Рис. 7. Модель (схема) купола телескопа с нагреваемой Солнцем стороной (*a*); нагреваемая Солнцем поверхность купола (*б*)

Обращенная к Солнцу сторона нагревается до максимальной температуры T_{\max} в точке под прямыми солнечными лучами; по мере удаления от точки максимума температура плавно уменьшается до T_{\min} . Температура других неосвещенных сторон — T_{\min} (рис. 7, б).

3.2. Эксперимент и моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха внутри модели купола в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 8, цв. вклейка).

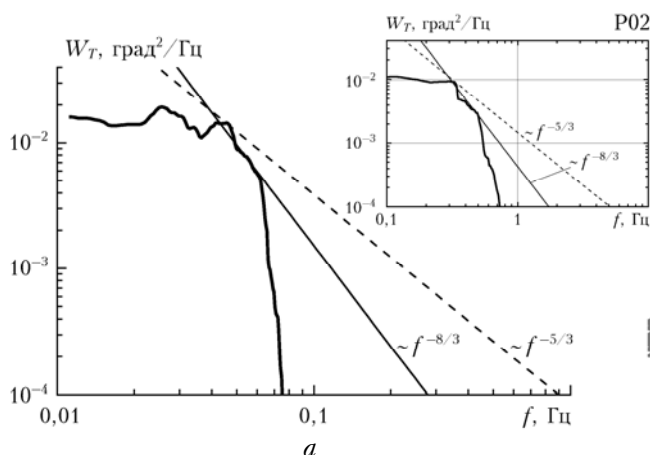
Из сравнения данных рис. 6, б и рис. 8 видно, что картина движения воздуха, полученная в результате численного моделирования когерентных структур (см. рис. 8), практически совпадает с ранее независимо экспериментально зарегистрированной нами приближенной картиной осредненных движений воздуха в подкупольном пространстве БТА (см. рис. 6, б). Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают наличие в куполе БТА двух воздушных вихрей с вертикально ориентированными осями и противоположными направлениями вращений.

На рис. 9 (цв. вклейка) показаны фазы эволюции (слева направо) вихрей с вертикальными осями. Совместно эти вихри можно интерпретировать как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом объеме купола.

Как видно из рис. 8 и 9, в движениях воздуха внутри купола БТА практически отсутствуют мелкие неоднородности размерами менее фиксированного минимального диаметра каждого вихря, поэтому можно ожидать крутого (быстрого) убывания спектра турбулентности на высоких частотах.

3.3. Спектральный анализ

На рис. 10 показаны рассчитанный и экспериментальный временные частотные спектры флуктуаций температуры W_T в куполе телескопа БТА (в точке P02).



Теоретический спектр оказывается практически таким же, как и ранее зарегистрированный экспериментальный спектр. Имеется небольшой $8/3$ -степенной участок убывания спектра с дальнейшим, как и можно было ожидать, более быстрым убыванием на высоких частотах.

4. Кубическое помещение

4.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента нами сформулирована следующая краевая задача.

Модель кубического помещения (рис. 11, а) имеет размеры (в \times ш \times г): $3 \times 3 \times 3$ м. Граничные условия Дирихле: $T_{\max} = 10^\circ$, $T_{\min} = T_{\max} \cdot e^{-1} \approx 3,7^\circ$; $T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\text{левая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\text{правая стенка}} = T_{\min}$; $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\max}$; скорости на границах объема $U = V = W = 0$. Внутри объема подобная воздуху среда: $\nu = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$.

4.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения внутри модели куба в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 12, цв. вклейка).

Как видно, внутри закрытого кубического помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны) с горизонтально ориентированными осями (рис. 12).

Рис. 13 (цв. вклейка) иллюстрирует фазы формирования конвективных ячеек Бенара: наблюдается эволюция тороидальной упорядоченной вихревой структуры, ограниченной кубическим помещением.

4.3. Спектральный анализ

На рис. 14 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T в кубическом помещении (в точках P02 и P12).

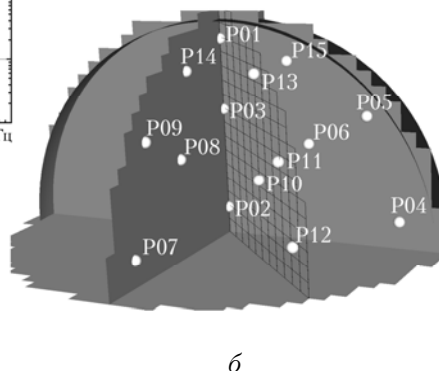


Рис. 10. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T . Моделирование. В правом верхнем углу — экспериментальный спектр W_T (а). Схема расположения точек измерения параметров (вертикальный срез купола; вертикальные плоскости приведены для визуального ориентирования). Вид спереди сверху (б)

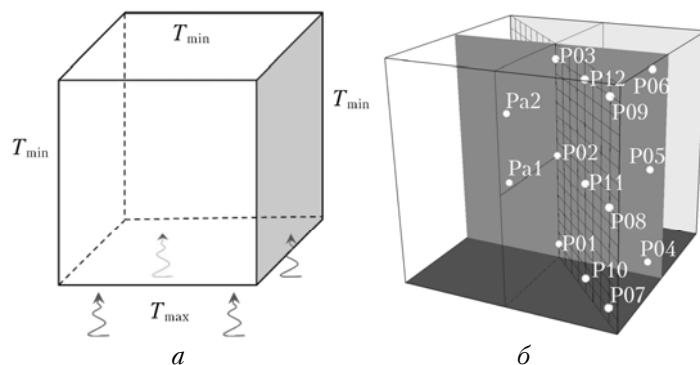


Рис. 11. Модель (схема) кубического помещения. Вид спереди (а). Схема расположения точек измерения параметров: P01...P12, Pa1, Pa2 (вертикальные плоскости приведены для ориентирования) (б)

Теоретические спектры имеют $8/3$ -степенное убывание в большей части инерционного интервала.

объема находится вязкая подобная силиконовому маслу среда: $\nu = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho = 980 \text{ кг}/\text{м}^3$.

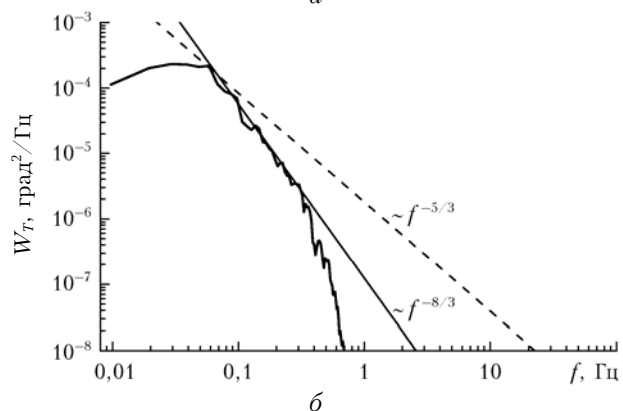
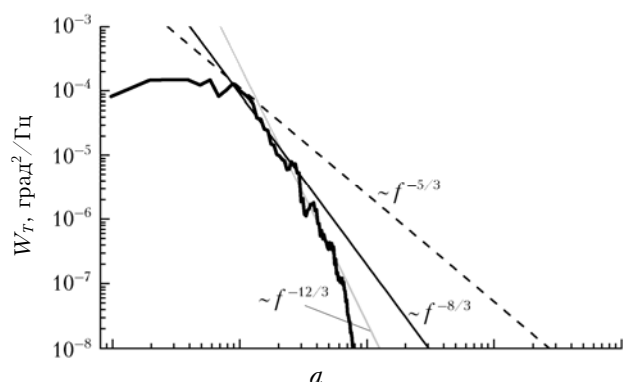


Рис. 14. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T (моделирование): а – в точке P02; б – P12

Такое убывание соответствует когерентной турбулентности [2–8].

5.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения внутри модели кюветы в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (см. рис. 15).

В кювете наблюдается периодическая структура из конвективных ячеек Бенара, упорядоченная (выровненная) вдоль диагоналей квадрата (диагональная симметрия), и существуют неоднородности (рис. 15, б, ж) с достаточно широким диапазоном размеров.

5.3. Спектральный анализ

На рис. 16 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T в плоской квадратной кювете (в точке P05).

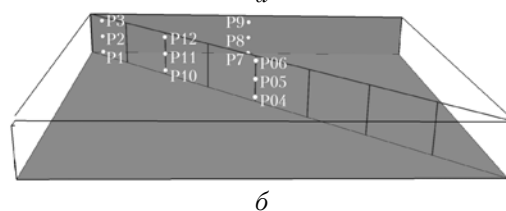
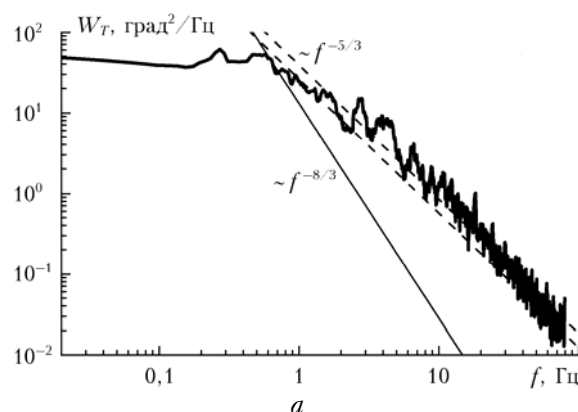


Рис. 16. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T (моделирование) (а). Схема расположения точек измерения статистических параметров (вертикальная сеточная плоскость показана для визуального ориентирования в расположении точек). Вид спереди сверху (б)

5. Плоская квадратная кювета

5.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента нами сформулирована следующая краевая задача.

Модель кюветы (рис. 15, а, цв. вклейка) имеет размеры (ш × в × г): $24 \times 3 \times 24 \text{ мм}$. Граничные условия Дирихле: $T_{\min} = 0^\circ$, $T_{\max} = 50^\circ$; $T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\min}$; $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\max}$; $T_{\text{левая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\text{правая стенка}}$ — не заданы ($T \sim$); скорости на границах объема $U = V = W = 0$. Внутри

Данные рис. 16 показывают, что теоретический спектр температуры практически на всем протяжении инерционного интервала близок к колмогоровскому ($5/3$ -колмогоровское степенное убывание). Соответствующее когерентной турбулентности $8/3$ -убывание наблюдается только в узкой окрестности максимума. Появление колмогоровского спектра можно объяснить [18–21] присутствием в кювете (см. рис. 15, б, ж) неоднородностей с широким диапазоном размеров.

6. Труба квадратного сечения

6.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента нами сформулирована следующая краевая задача.

Модель трубы квадратного сечения (рис. 17) имеет размеры (ш × в × г): $2,4 \times 0,3 \times 0,3$ м. Граничные условия Дирихле: $T_{\min} = 0^\circ$, $T_{\max} = 5^\circ$, $T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\min}$; $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\max}$; $T_{\text{левая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\text{правая стенка}} = T_{\sim}$ — не заданы (T_{\sim}); скорости на границах объема $U = V = W = 0$. Внутри объема вязкая среда: $\nu = 10^{-4}$ м²/с.

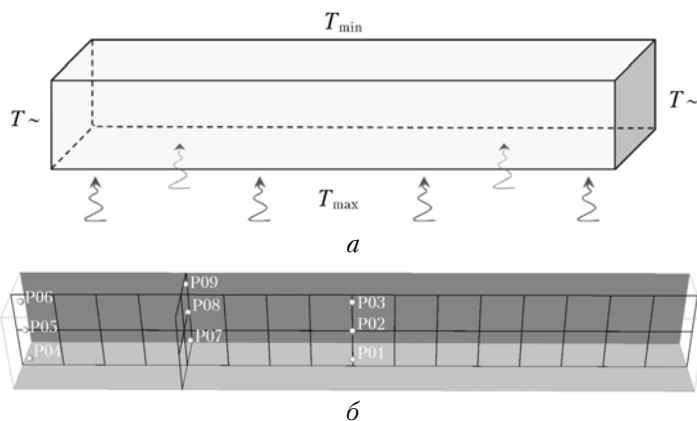


Рис. 17. Модель (схема) трубы (а); схема расположения точек измерения параметров (вертикальные сеточные плоскости — для ориентирования) (б). Вид спереди сверху

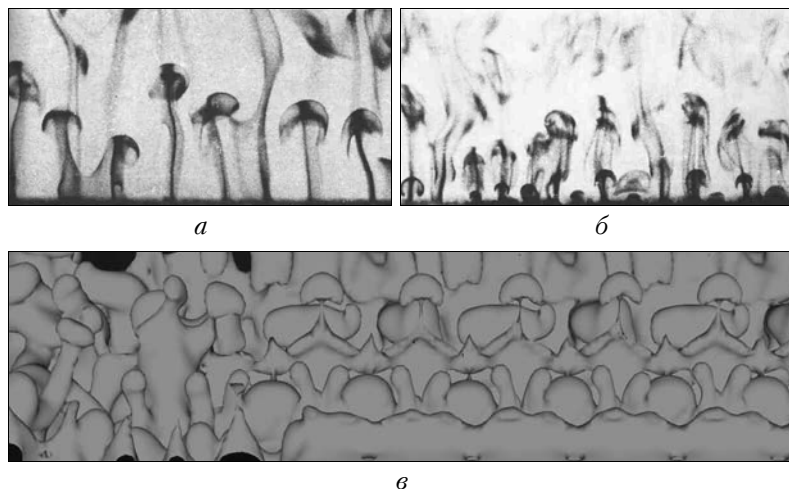


Рис. 24. Термики (конвективные ячейки Бенара): слабый (а) и сильный (б) нагрев поверхности в эксперименте [33] (фотографии из альбома [33], отражение света в парах масла); нагрев нижней стенки (наше моделирование) (в). Вид спереди сверху

6.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения внутри модели трубы в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 18–21, цв. вклейки).

На рис. 22 (цв. вклейка) приведен экспериментальный результат нагрева снизу силиконового масла в прямоугольном ящике [33]. Как видно, равномерный нагрев снизу создает валики, параллельные более короткой стороне. Сравнение данных рис. 18–21 и 22 показывает, что такой же результат (валики, параллельные более короткой стороне трубы) дает и наше численное моделирование.

6.3. Пристеночная турбулентность (термики)

В качестве отдельной задачи на рис. 23–25 приведены численные результаты формирования пристеночной турбулентности (термики, конвективные ячейки Бенара) в трубе квадратного сечения.

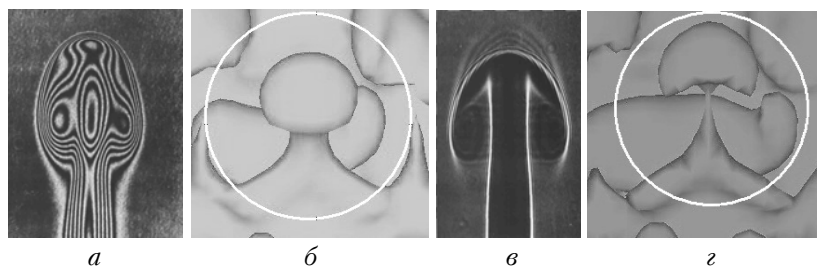


Рис. 25. Один термик (конвективная ячейка Бенара): эксперимент [33] (*а, в*); моделирование (увеличенный рис. 23, *ж*) (*б*); моделирование (увеличенный рис. 23, *з*), светлая окружность сфокусирована на термике (*г*)

В целом пристеночную турбулентность можно рассматривать как начальную стадию формирования ячеек Бенара в нагретом снизу закрытом пространстве.

Как видно из рис. 23–25, наше численное моделирование дает картины формирования одного термика и групп термик (общую картину формирования пристеночной турбулентности), практически совпадающие с данными экспериментов [33].

6.4. Спектральный анализ

На рис. 26 показаны рассчитанные временные частотные спектры флуктуаций температуры W_T и скорости W_U в трубе квадратного сечения (в точке P02).

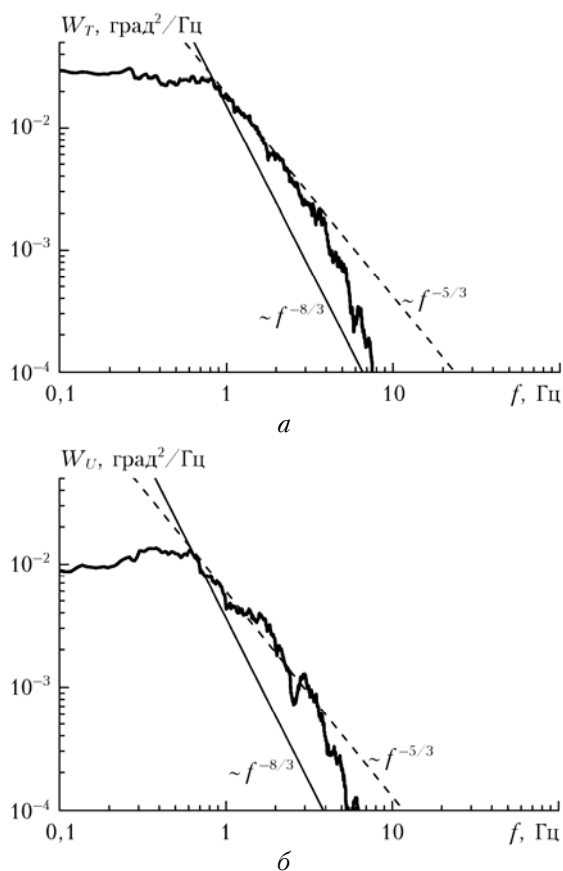


Рис. 26. Временной частотный спектр (моделирование): флуктуаций температуры W_T (*а*); флуктуаций скорости (U) W_U (*б*)

Как видно из рис. 26, теоретический спектр практически на всем протяжении инерционного интервала близок к колмогоровскому ($5/3$ -колмогоровское степенное убывание). Соответствующее когерентной турбулентности $8/3$ -убывание наблюдается только в небольшой окрестности максимума. Наличие колмогоровского спектра легко объясняется (см., например, наши работы [18–21]) присутствием в пристеночной турбулентности неоднородностей с широким диапазоном размеров (см. рис. 24).

Численный расчет подтверждает сформулированный ранее нами вывод [18, 19, 21], что смешивание многих когерентных структур с разными близкими размерами (и с различными близкими частотами главных вихрей) дает в итоге некогерентную колмогоровскую турбулентность.

7. Купол (полусфера)

7.1. Краевая задача

Настоящая краевая задача выбрана для изучения картины движения достаточно вязкой среды внутри полусферы (купола) без внешнего солнечного нагрева и сравнения ее с картиной движений внутри купола БТА (см. разд. 3).

Модель полусферы (купола) (рис. 27) имеет следующие размеры ($\varnothing \times \text{в}$): $3 \times 1,5$ м. Граничные условия Дирихле: $T_{\max} = 10^\circ$, $T_{\min} = T_{\max} \cdot e^{-1}$, $T_{\text{поверхности купола}} = T_{\min}$; $T_{\text{основания}} = T_{\max}$; нулевые скорости на границах объема: $U = V = W = 0$. Внутри объема вязкая среда: $\nu = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$.

7.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри модели купола в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 28, цв. вклейка).

Внутри нагреваемой снизу и охлаждаемой сверху полусферы с вязкой средой наблюдаются несколько осесимметричных вихрей или несколько примыкающих друг к другу топологических солитонов. В нестационарном режиме (рис. 28, *е*) имеется четыре таких вихря с достаточно сложным внутренним устройством (в отличие от двух вихрей в БТА, см. разд. 3).

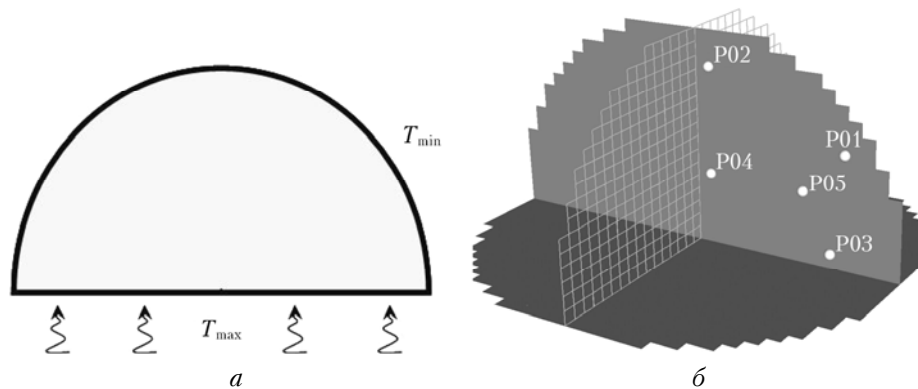


Рис. 27. Модель (схема) купола. Вид спереди (а). Схема расположения точек измерения параметров (вертикальные плоскости – для ориентирования в расположении точек). Вид сверху (б)

Размеры возникающих неоднородностей вихревого движения (гармоники) (рис. 28, в, д, е) находятся в широком диапазоне (присутствуют даже спиральные быстро закручивающиеся вихри, обладающие большим набором разных гармоник). Однако очень мелкие неоднородности (по сравнению с фиксированными минимальными размерами самих сформировавшихся вихрей) отсутствуют. Этот факт позволяет предполагать, что спектр флуктуаций будет иметь достаточно протяженный колмогоровский инерционный интервал с быстрым убыванием на высоких частотах.

7.3. Спектральный анализ

На рис. 29 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T внутри полусферы с вязкой средой.

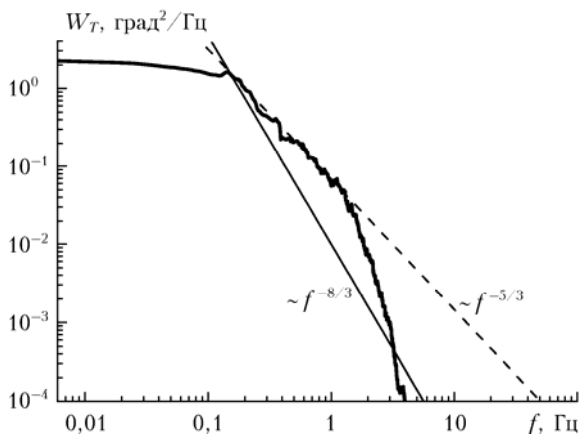


Рис. 29. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T внутри полусферы с вязкой средой (для точки P05)

Видно, что теоретический расчетный спектр на начальном участке инерционного интервала соответствует $5/3$ -колмогоровской степенной зависимости. Однако с ростом частоты спектр, как и следовало ожидать, имеет более быстрое убывание на высоких частотах.

В целом сравнение полученных нами расчетных данных в закрытых объемах для сред с малой (см.

разд. 2–4, воздух) и большой (разд. 5 и 7) вязкостью показывает, что в средах с большой вязкостью чаще наблюдаются спиральные сильно закручивающиеся вихри. Такие вихри обычно имеют достаточно широкий набор гармоник с разными близкими периодами (с разными близкими размерами). Поэтому, в соответствии с выводами наших экспериментальных работ [18–21], в средах с большой вязкостью можно ожидать появления достаточно протяженного инерционного интервала спектра с колмогоровским $5/3$ -убыванием. Спектральные данные разд. 5 и 7 соответствуют этому выводу.

8. Открытое пространство над одним нагретым пятном

8.1. Краевая задача

Интересным представляется изучение движений среды в открытом пространстве (в объеме) над одним нагретым пятном на нижней поверхности. Решение этой достаточно простой по условиям задачи важно для понимания картины движений среды над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью.

Модель открытого кубического пространства имеет следующие размеры (куб, в × ш × г): $10 \times 10 \times 10$ км.

На нижней грани объема (рис. 30) заданы граничные условия Дирихле: $T_{\text{нижней грани}} = T_{\text{min}}$; скорости $U = V = W = 0$. $T_{\text{min}} = 0^\circ$, $T_{\text{max}} = 20^\circ$. В центре основания куба расположено нагретое круглое пятно радиусом $R = 0,3$ км и $T = T_{\text{max}}$.

На боковых гранях куба заданы граничные условия Неймана (открытое пространство): на левой и правой гранях $\partial U/\partial x = 0$, $\partial P/\partial x = 0$; на передней и задней гранях $\partial W/\partial z = 0$, $\partial P/\partial z = 0$. На верхней грани – смешанные граничные условия Неймана $\partial V/\partial y = 0$ и Дирихле $P = 0$. Внутри объема подобная воздушная среда: $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho = 1$ кг/м³.

8.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 30, цв. вклейка).

Видно, что над одним нагретым пятном вначале происходит постепенное формирование одиночного термика (аналог ячейки Бенара, трехмерный топологический солитон). Со временем (в следующих фазах формирования общей картины движения) этот термик поднимается вверх и практически отрывается от подстилающей поверхности (сохраняя при этом связь с поверхностью).

Сравнивая рис. 30, *д* (завершающая фаза формирования термика) и рис. 30, *е*, можно увидеть практическое совпадение картины движения воздуха, полученной в результате численного моделирования, и картины движений в зарегистрированном над морем крупном термике, подкрашенном облачной средой.

Заключение

1. В работе представлены результаты численных решений уравнений Навье–Стокса в закрытых помещениях, без обмена веществом среды на границах.

2. Рассмотрены различные типы (формы) помещений при разных граничных условиях на поверхностях. Приведены результаты решения восьми краевых задач: павильон спектрографа и подкупольное помещение крупных астрономических телескопов (БСВТ и БТА), кубическое помещение, плоская квадратная ювета, труба квадратного сечения, пристеночная турбулентность (термики), купол (полусфера с вязкой средой), открытое пространство над одним нагретым пятном.

3. Показано, что для всех рассмотренных краевых задачах внутри закрытых помещений наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры или топологические солитоны).

4. При одинаковых краевых условиях картины движений, полученные численным моделированием и независимо зарегистрированные авторами ранее экспериментально (в воздухе помещений БСВТ и БТА), практически совпадают. Совпадают также картины движения сред внутри других закрытых объемов, полученные нами численным моделированием и экспериментально зарегистрированные ранее в работах других авторов (приведены в известном альбоме Van Dyke).

5. Рассмотрены различные фазы существования уединенных вихрей (ячеек Бенара, солитонов). Эти фазы показывают: а) либо стационарность вихрей при малом количестве продуктов их распада (обычно спектры когерентной турбулентности с $8/3$ -степенным убыванием), б) либо нестационарность движений в присутствии промежуточных более мелких вихрей, которые можно интерпретировать как продукты распада крупных вихрей (обычно спектры колмогоровской турбулентности с $5/3$ -убыванием).

6. В закрытых помещениях вначале кратковременно возникает предварительный образ стационарной картины движений (топологические предвестники), сменяющийся периодом хаотизации. Переход от состояния хаоса (нестационарные движения, быстро распадающиеся вихри) к стационарным движениям (очень медленно распадающиеся вихри) происходит обычно за период: а) в несколько десятков

секунд (силиконовое масло и маслоподобные жидкости), б) от минуты до десятков минут (воздух).

7. Численные расчеты подтверждают сформулированный нами ранее экспериментальный вывод, что смешивание многих когерентных структур с разными близкими размерами (и с близкими частотами главных вихрей) дает некогерентную колмогоровскую турбулентность.

8. В средах с большой вязкостью (с большим внутренним трением) чаще наблюдаются спиральные сильно закручивающиеся вихри, так как внутреннее трение вызывает изменение скоростей (периодов колебаний) трущихся микрообъемов среды. Поэтому спиральные вихри обычно имеют достаточно широкий набор гармоник с разными близкими периодами (с разными близкими размерами). Таким образом, в соответствии с выводами наших экспериментальных работ в средах с большой вязкостью можно ожидать появления достаточно протяженных инерционных интервалов спектра с колмогоровским $5/3$ -убыванием. Спектральные данные наших расчетов подтверждают этот вывод.

9. Таким образом, полученные нами результаты численных решений уравнений Навье–Стокса в закрытых помещениях позволяют: а) утверждать, что описание когерентной турбулентности возможно на основе решения краевых задач гидродинамики (уравнения Навье–Стокса); б) по-новому взглянуть на проблему детерминированного хаоса.

Авторы выражают искреннюю признательность Stéphane Popinet за его значительный бескорыстный вклад в развитие науки в виде разработанного им свободного программного обеспечения Gerris, что позволило нам сосредоточить свои усилия в исследовании законов гидродинамики.

Выражаем благодарность сотрудникам САО РАН В.В. Власюку и Г.В. Якопову, а также сотруднику ИОА СО РАН Е.А. Копылову за оказанное авторам содействие в проведении эксперимента в БТА.

Благодарим сотрудников Института солнечно-земной физики СО РАН В.М. Григорьева и П.Г. Ковадло за сотрудничество.

Окончательная редакция настоящей статьи выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-05-05404.

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.; Т. 2. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 742 с.
2. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 1 // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013–1021; Ч. 2 // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 207–217.
3. Nosov V.V., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Astroclimate of specialized rooms of the Large solar vacuum telescope. Part 1 // Atmos. Ocean. Opt. 2007. V. 20, N 11. P. 926–934; Part 2 // Atmos. Ocean. Opt. 2008. V. 21, N 3. P. 180–190.
4. Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Astroclimate of specialized stations of the Large Solar Vacuum Telescope: Part I //

- Proc. SPIE. 2007. V. 69360P. P. 1–11; Part II // Proc. SPIE. 2008. V. 69360Q. P. 1–12.
5. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Papushev P.G., Torgaev A.V.* Astroclimate inside the dome of AZT-14 telescope of Sayan Solar Observatory // Proc. SPIE. 2007. V. 69361R. P. 1–4.
 6. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 14. С. 97–113.
 7. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Coherent structures in turbulent atmosphere // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 53–70.
 8. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Coherent structures in the turbulent atmosphere // Mathematical Models of Non-linear Phenomena, Processes and Systems: From Molecular Scale to Planetary Atmosphere, Eds. A.B. Nadycto et al. N.Y.: Nova Science Publishers. USA. 2013. Chap. 20. P. 297–330.
 9. *Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759.
 10. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Kovadlo P.G.* Atmospheric coherent turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
 11. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Result of measurements of the astroclimate characteristics of astronomical telescopes in the mountain observatories // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-11. P. 82–87.
 12. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Astroclimate parameters of the surface layer in the Sayan solar observatory // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-12. P. 87–94.
 13. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность вблизи приемной апертуры астрономического телескопа // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 212–214.
 14. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность на территории Байкальской астрофизической обсерватории // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 204–205.
 15. *Носов В.В., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в атмосфере, возникающие при обтекании препятствий // Мат-лы XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 645–648.
 16. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Results of measurements of A.N. Kolmogorov and A.M. Obukhov constants in the Kolmogorov–Obukhov law // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 70–77.
 17. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Structure function of temperature fluctuations in coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-13. P. 94–97.
 18. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры – элементарные составляющие атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 236–238.
 19. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* The Solitonic Hydrodynamical Turbulence // Proc. VI Int. Conf. «Solitons Colapses and Turbulence: Achievements Developments and Perspectives». Novosibirsk, 2012. P. 108–109.
 20. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Проблема когерентной турбулентности // Вестн. МГТУ «Станкин». 2013. Т. 24, № 1. С. 103–107.
 21. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные составляющие турбулентности // Тезисы докл. Междунар. конф., посвященной памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». I. Турбулентность. М.: ИФА РАН, 2013. С. 43–47.
 22. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Decrease of the light wave fluctuations in the coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-10. P. 77–82.
 23. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
 24. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Оптимальное размещение наземных коротковолновых приемников атмосферных телекоммуникационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 76–82.
 25. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Флуктуации астрономических изображений в когерентной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 223–225.
 26. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Интегральная интенсивность атмосферной турбулентности по данным высокогорных оптических измерений // Тезисы докл. XVII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2011. С. B113–B116.
 27. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Интенсивность колмогоровской и когерентной турбулентности по данным атмосферных высокогорных наблюдений // Мат-лы V Всерос. научн. конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». II Всероссийские Армавирские чтения. Муром, 2012. [Электронный ресурс]. 1 CD-ROM. С. 72–75. ISSN 2304–0297.
 28. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Intermittency of the astronomical images jitter in the high-mountain observations // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. AO200-47.
 29. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2002–2014. URL: <http://gfs.sf.net>
 30. *Popinet S.* Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries // J. Comput. Phys. 2003. V. 190, N 2. P. 572–600.
 31. *Popinet S., Smith M., Stevens C.* Experimental and numerical study of the turbulence characteristics of air flow around a research vessel // J. Ocean Atmos. Technol. 2004. V. 21, N 10. P. 1574–1589.
 32. *Popinet S.* 100 Gerris Tests. V. 1.3.2. URL: <http://gerris.dalembert.upmc.fr/gerris/tests/tests/index.html>; Gerris: Bibliography. URL: <http://gfs.sf.net/wiki/index.php/Bibliography>; List of recent publications. URL: <http://gfs.sf.net/wiki/index.php/User:Popinet>
 33. *Van Dyke M.* An album of fluid motion. The Parabolic Press, 1982. 175 p.; *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 184 с.

V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. **Simulation of coherent structures (topological solitons) inside closed rooms by solving numerically hydrodynamic equations.**

Coherent structures (three-dimensional topological solitons) inside closed rooms had been simulated by solving numerically hydrodynamic equations (Navier–Stokes equations). A closed room is a volume without the exchange of internal and external medium through the borders. Results of eight boundary value problems are given: spectrograph pavilion and telescope dome of large astronomical telescopes (LSVT and BTA), cubic room, flat square cuvette, square section tube, parietal turbulence (thermals), dome (hemisphere with a viscous medium), and open space above one heated spot. Solitary large vortices (coherent structures or topological solitons) are observed inside the volume. The patterns of air motion as a result of simulation of coherent structures with identical boundary conditions are practically the same as the patterns, independently recorded earlier in our experiments (indoors LSVT and BTA). Also inside other volumes the patterns of medium motion as a result of simulation of coherent structures are practically the same as the patterns, previously recorded at experiments by other authors.

Simulations confirm the previously formulated experimental conclusion that mixing of many coherent structures with different close sizes (and with close frequencies of main vortices) gives non-coherent Kolmogorov turbulence. In addition, relatively long inertial intervals of spectrum with Kolmogorov $5/3$ -exponential decay are observed in highly viscous media.

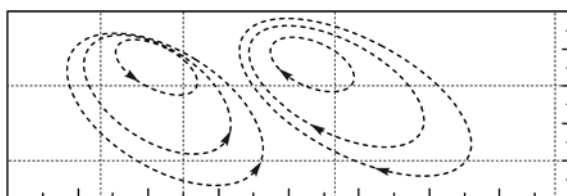


Рис. 2. Экспериментально зарегистрированная приближенная картина осредненных движений воздуха в павильоне спектрографа БСВТ в вертикальной плоскости. Эллипсы – траектории осредненных движений

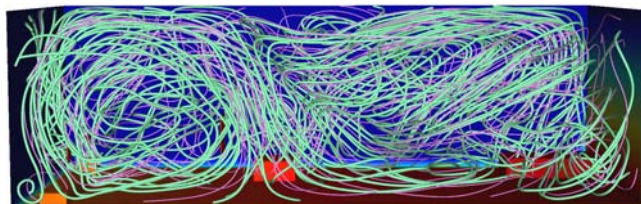


Рис. 3. Картина движения воздуха, полученная в результате моделирования когерентных структур в павильоне спектрографа БСВТ. Вид спереди. Сплошные линии – линии тока. Краевые условия и средние температурные градиенты в помещении соответствуют данным рис. 2

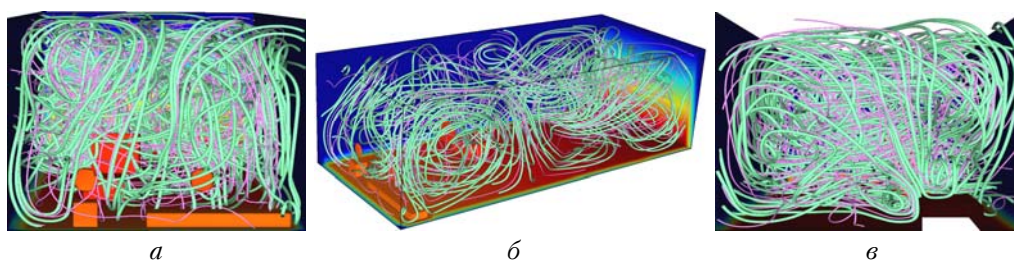


Рис. 4. То же, что и на рис. 3: вид слева (а); вид сверху слева спереди (б); вид справа (с). Сплошные линии – линии тока

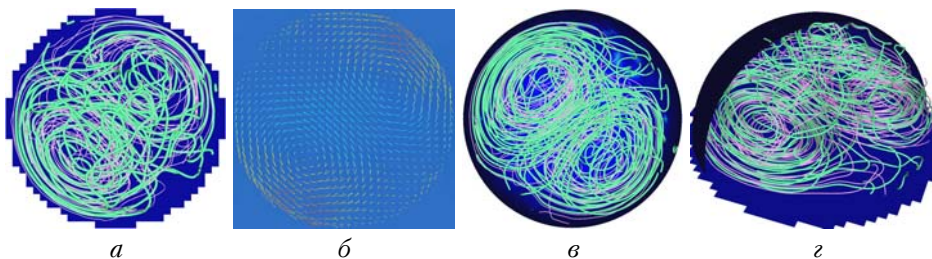


Рис. 8. Расчетная картина стационарных движений воздуха внутри модели купола БТА (момент времени моделирования $t = 48$ мин 19 с): вид сверху (а); горизонтальное сечение поля скоростей (вид сверху) (б); вид снизу (с); общий вид (вертикальный срез купола) (д). Сплошные линии – линии тока

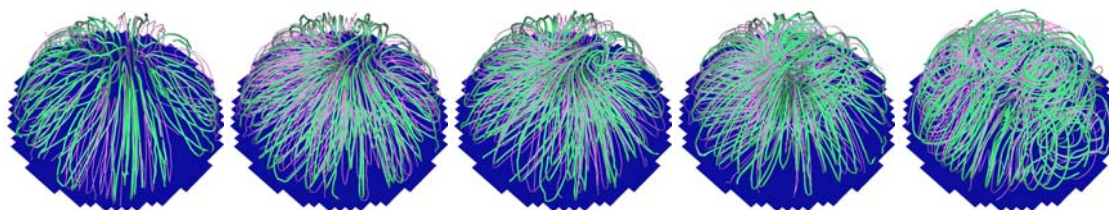


Рис. 9. Фазы формирования конвективных ячеек Бенара (общий вид): эволюция слева направо. Зарождение двух вихрей с вертикально ориентированными осями ($t = 29,9; 110,2; 139,6; 209,2; 349,7$ с). Сплошные линии – линии тока

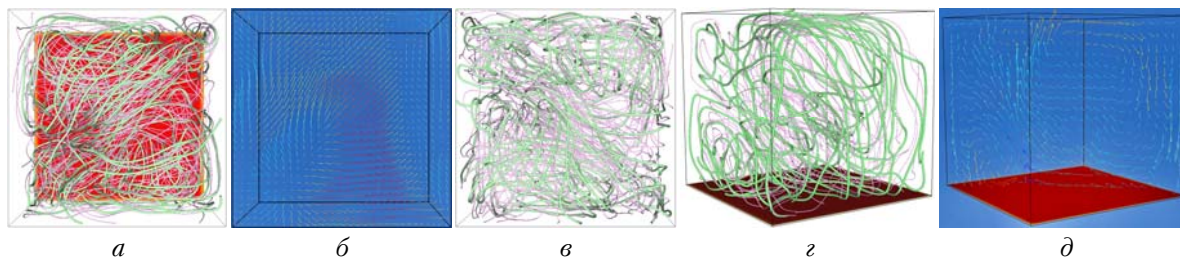


Рис. 12. Картина движения внутри модели кубического помещения: вид сверху (а); вид сверху горизонтального сечения поля скоростей (вблизи верхней стороны) (б); вид снизу (с); вид сбоку (д); вертикальное сечение поля скоростей (для рис. 12, д) (е). Сплошные линии – линии тока

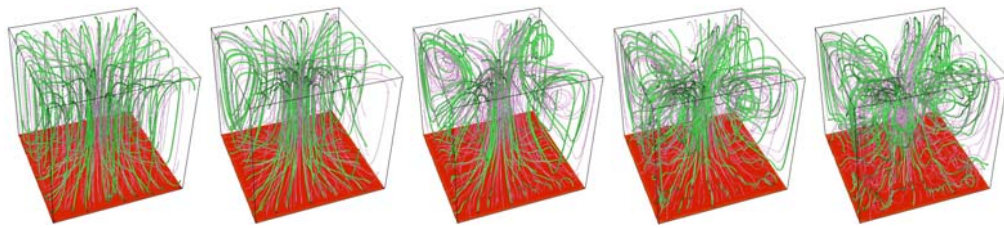


Рис. 13. Фазы формирования конвективных ячеек Бенара: эволюция (слева направо). Сплошные линии — линии тока

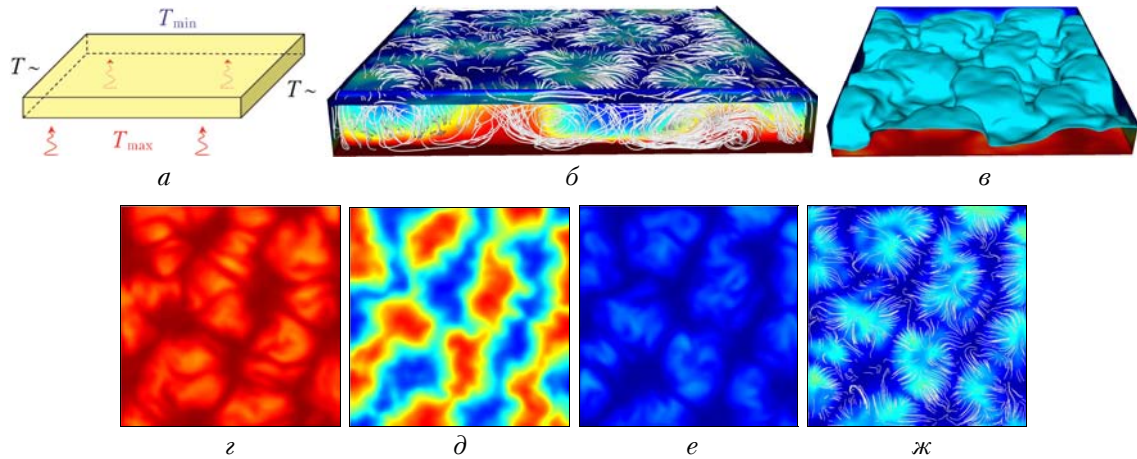


Рис. 15. Модель (схема) кюветы (а); линии тока в конвективных ячейках на фоне вертикального сечения поля температур (б); изотермическая поверхность $T = 17^\circ$ (в); вид сверху горизонтального сечения поля температур на уровне 5%-й высоты кюветы (г); 50% (д); 95% (е); линии тока в конвективных ячейках (ж). Вид сверху

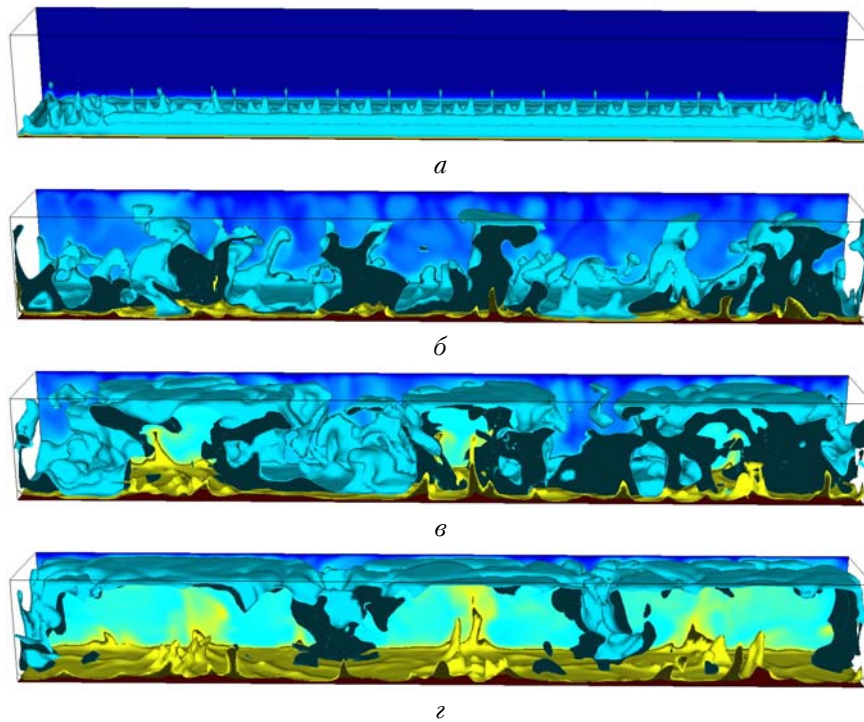


Рис. 18. Фазы формирования конвективных ячеек Бенара: в момент времени моделирования $t = 2,0$ (а); $9,2$ (б); $13,6$ (в); $18,1$ с (г). Голубой цвет — изотермическая поверхность $T = 1,69^\circ$, желтый — $T = 3,03^\circ$

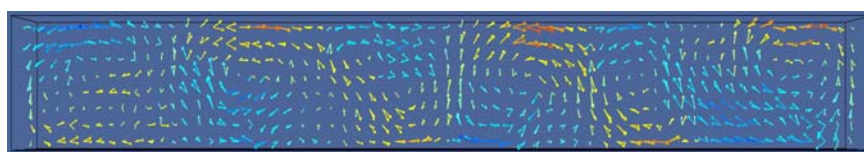


Рис. 19. Моделирование. Равномерный нагрев снизу создает валики, параллельные более короткой стороне. Вертикальное сечение поля скоростей (на укрупненной сетке) обрисовывает внутреннюю структуру конвективных ячеек Бенара ($t = 66,3$ с)

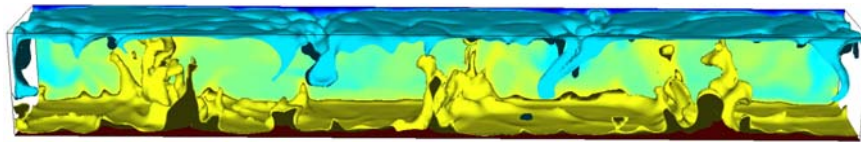


Рис. 20. Моделирование. Изотермические поверхности обрисовывают конвективные ячейки Бенара ($t = 66,3$ с)

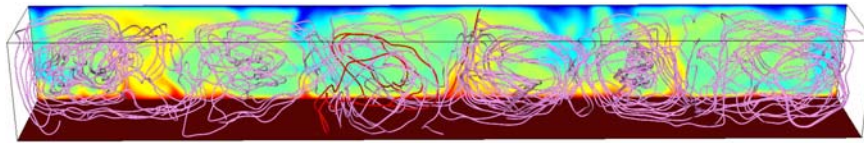


Рис. 21. Моделирование. Сплошные линии – линии тока внутри конвективных ячеек Бенара ($t = 66,3$ с)

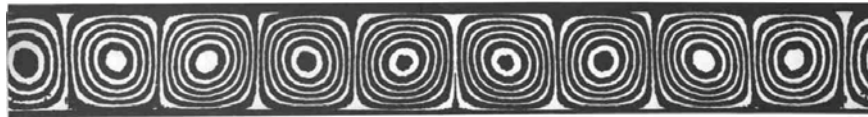


Рис. 22. Эксперимент [33]. Конвективные валики, движимые плавучестью. Картина конвективной неустойчивости силиконового масла в прямоугольном ящике. Равномерный нагрев снизу создает валики, параллельные более короткой стороне. Фотография из альбома [33] (сплошные линии – аналог линий тока)

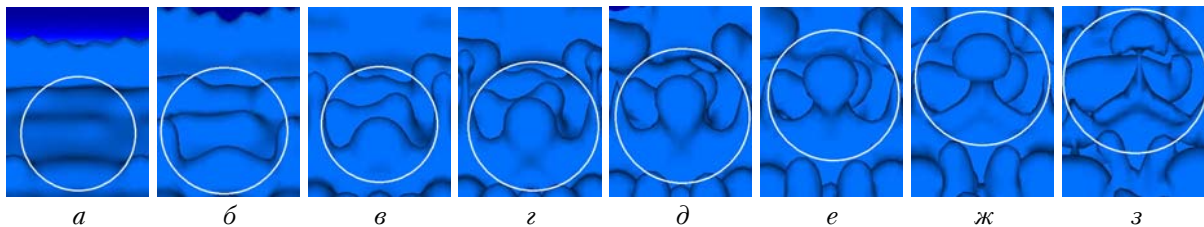


Рис. 23. Фазы формирования пристеночной турбулентности (термики, конвективные ячейки Бенара): в момент времени моделирования $t = 1,30$ (а); 1,46 (б); 1,59 (в); 1,64 (г); 1,70 (д); 1,75 (е); 1,80 (ж); 1,85 с (з). Белая окружность – вокруг зарождающегося термика

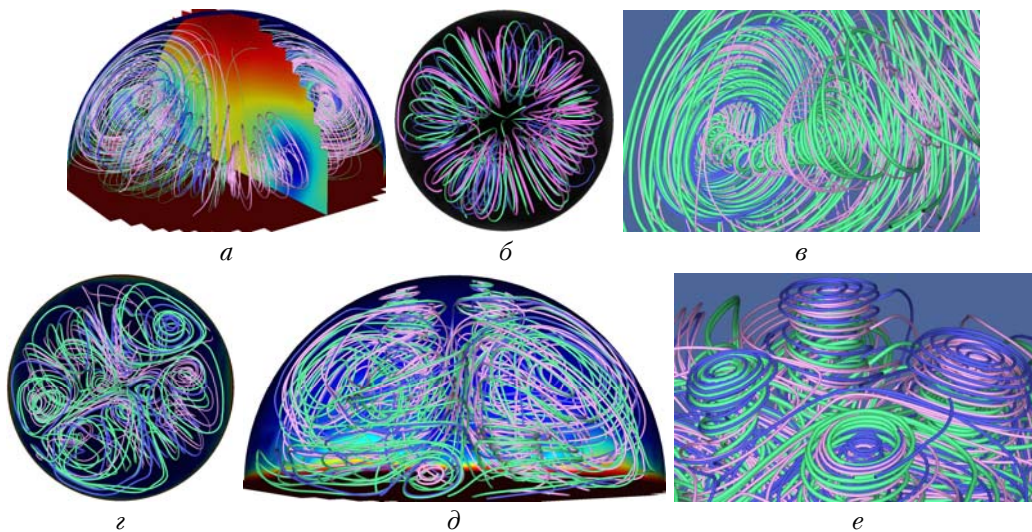


Рис. 28. Картина движения среды внутри модели купола, нагреваемого снизу и охлаждаемого сверху (сплошные линии – линии тока): вертикальное сечение поля давления, красный цвет – повышение давления, синий – понижение (а); вид снизу (б); внутренняя тонкая структура (в); вид снизу (г); вид сбоку (д); внутренняя тонкая структура (вблизи вершины купола) (е). а, б, в соответствуют моменту времени моделирования $t = 15$ с; г, д, е – $t = 18$ с

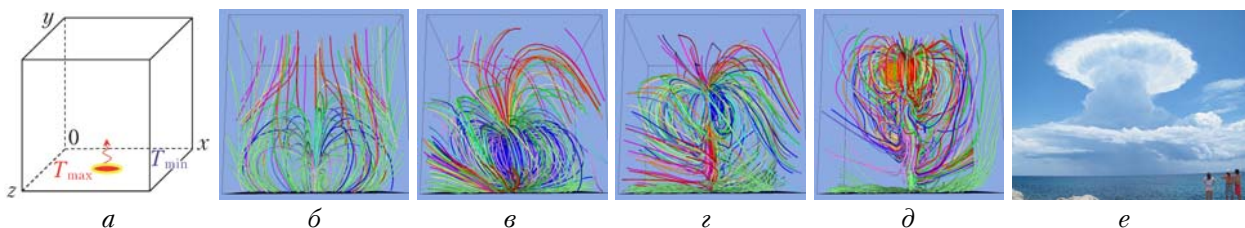


Рис. 30. Модель открытого кубического пространства над одним нагретым пятном (а); фазы формирования конвективной ячейки Бенара (зарождение крупного термика) от одного нагретого пятна: эволюция (слева направо) (б–д). Сплошные линии – линии тока; цвет линий соответствует разным высотам; термик над морем, подкрашенный облачной средой (е), фото [http://planeta.moy.su/blog/griby_v_nebe_strannye_griboobraznye_oblaka_po_vsemu_miru/2011-09-03-5978]