

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 532.507; 519.6

**Структура движений воздуха на оптических трассах  
в специализированных помещениях  
астрономических телескопов.  
Численное моделирование**

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

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 27.02.2015 г.

Исследована структура движений воздуха в крупных специализированных помещениях астрономических телескопов. В таких помещениях конструктивно размещены оптические элементы крупноапертурных телескопов. Исследования проведены путем численного решения нескольких краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса). Основное внимание уделено закрытым помещениям с разным нагревом нижних и верхних поверхностей, без обмена веществом среды через границы. Это дает возможность тестирования в стационарных условиях оптических характеристик астрономических телескопов, включая их разрешающую способность. В частности, визуализация движений воздуха линиями тока позволяет выполнить анализ влияния конструктивных особенностей телескопа и температурного режима его оптических элементов на устойчивость воздушной среды.

Результаты численных расчетов показывают, что в специализированных помещениях наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Каскадный распад этих вихрей порождает когерентную турбулентность. Подтверждается также сформулированный нами ранее экспериментальный вывод, что смешивание когерентных структур с разными близкими размерами (и с близкими частотами главных вихрей) дает некогерентную колмогоровскую турбулентность.

*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

Результаты натуральных экспериментов показывают, что внутри закрытых помещений наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры или топологические солитоны) [1–4]. Гидродинамическая когерентная структура – компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную вихревую структуру (ячейку), возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. В расширенном понимании когерентная структура – солитонное решение уравнений гидродинамики (топологический трехмерный солитон, уединенная волна). Это либо односолитонное решение, либо один солитон в многосолитонном решении [5–11].

В результате действия термодинамических градиентов (температуры или давления) на границах некоторого выделенного объема в жидкой среде возникает пространственная вихревая структура (ячейка, энергонесущий вихрь). Такая ячейка может быть одна или их может быть много. Ячейки представляют

собой результат трансформации энергетических возмущений на границах объема в движение жидкой среды. В расширенном определении одна такая (обычно долгоживущая) ячейка вместе с продуктами дискретного когерентного каскадного распада самой этой ячейки называется когерентной структурой [1–9, 11].

Когерентная структура содержит как крупно-, 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-степенное убывание) по сравнению с колмогоровским 5/3-степенным убыванием [1–7].

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

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nu \Delta \mathbf{u} - \rho^{-1} \nabla p + \mathbf{f};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

где  $\mathbf{u}$  – скорость;  $t$  – время;  $p$  – давление;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{f}$  – ускорение сторонних сил.

Описание когерентной турбулентности возможно на основе решения краевых задач гидродинамики,

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

описываемых уравнениями Навье–Стокса. Аналитическое решение уравнений Навье–Стокса по причине их нелинейности является сложной задачей, поэтому для их решения 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 [12].

В настоящей статье приведены результаты исследований структуры движений воздуха в крупных специализированных помещениях астрономических телескопов. В таких помещениях обычно конструктивно размещены оптические элементы крупноапертурных телескопов. В отличие от ранее исследованных в нашей работе [12] полусферических (купольных) помещений в данной статье рассмотрены прямоугольные закрытые помещения, содержащие оптические элементы и внутренние конструкции крупных астрономических телескопов (с вертикально ориентированной оптической осью). Исследование внутренней структуры движений нагретой среды на оптических трассах внутри телескопов (в специализированных помещениях) необходимо для оценок характеристик распространяющегося оптического излучения.

Основное внимание уделено закрытым помещениям с разным нагревом нижних и верхних поверхностей, без обмена веществом среды через границы (в отсутствие внешнего ветра). Закрытая верхняя поверхность специализированного помещения дает возможность тестирования в стационарных условиях различных оптических характеристик астрономических телескопов (включая их разрешающую способность).

Исследования проведены путем численного решения нескольких краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса).

Для решения краевых задач гидродинамики нами использовано The Gerris Flow Solver [13, 14] – свободное программное обеспечение (ПО) для решения уравнений в частных производных, описывающих задачи гидродинамики. ПО распространяется в открытых исходных кодах свободно и бесплатно. Его разработал Stéphane Popinet [13, 14]. Эффективность и требуемая точность ПО [13] проверена и подтверждена на достаточно широком классе 100 типичных тестовых задач [14], решение которых дает удовлетворительные результаты.

Для проведения численного моделирования поведения воздушных масс на оптических трассах в специализированных закрытых помещениях астрономических телескопов предложено три различных сценария. Каждый сценарий предполагает решение соответствующей краевой задачи гидродинамики и включает в себя:

- геометрическую модель помещения (габариты объема);
- начальные условия температуры, давления, плотности и вязкости среды;
- граничные условия температуры, скорости перемещения среды внутри объема;

- температурные градиенты на границах объема;
  - наличие или отсутствие конструкций телескопа и прочего оборудования внутри помещения (объема).
- Далее приведем решения краевых задач, соответствующих каждому рассмотренному сценарию.

## 1. Сценарий № 1

### 1.1. Краевая задача

Сценарий № 1 реализован для сравнения с данными других сценариев.

Для проведения численного эксперимента смоделирована следующая краевая задача.

– Для модели помещения (рис. 1.1, цв. вклейка) заданы размеры (ш × в × г): 20 × 20 × 8 м.

– Граничные условия Дирихле:

заданные температурные градиенты на поверхностях:  $\nabla T_{\text{вертик}} = 0,005 \text{ К/м}$ ; температуры поверхностей помещения:  $T_{\text{min}} = 293 \text{ К} (\approx 20 \text{ °C})$ ;  $T_{\text{max}} = 293,1 \text{ К}$ ;  $T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\text{правая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\text{min}}$ ;  $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\text{max}}$ ;  $T_{\text{боковые стенки}}(y) = T_{\text{max}} - \nabla T_{\text{вертик}} \cdot y$ , где  $y$  – вертикальная координата-высота, м; скорости на границах помещения  $U = V = W = 0$  ( $U$  –  $x$ -компонента скорости;  $V$  –  $y$ -компонента;  $W$  –  $z$ -компонента).

– Начальные условия внутри помещения:  $T_0 = T_{\text{min}}$ ; давление  $p_0 = 1013,25 \text{ мбар}$ .

Внутри помещения подобная воздуху среда: кинематическая вязкость  $\nu = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; плотность  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Помещение не содержит оптических элементов крупноапертурных телескопов.

Схема расположения точек измерения параметров около элементов конструкции телескопа приведена на рис. 1.1 (цв. вклейка).

Физическая интерпретация заданных граничных условий:

– прямоугольное помещение непрерывно нагревается со стороны нижней грани, при этом температура поверхности нижней грани постоянна и составляет  $T_{\text{max}}$ ;

– вертикально вверх вдоль всех боковых граней температура поверхностей помещения линейно уменьшается от максимума температуры ( $T_{\text{max}}$ ) согласно заданному градиенту  $\nabla T_{\text{вертик}} = 0,005 \text{ К/м}$ , что составляет на 20 м величину падения температуры  $\Delta T = 0,1 \text{ К}$  ( $20 \text{ м} \times 0,005 \text{ К/м}$ ) и приводит к значению температуры  $T_{\text{min}}$  на верхней грани помещения (потолок);

– верхняя грань помещения имеет постоянную температуру  $T_{\text{min}}$ .

### 1.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха в помещении в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 1.2–1.5, цв. вклейка). 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.

### 1.3. Эволюция конвективных ячеек

На рис. 1.6 (цв. вклейка) представлены картины движения воздуха внутри помещения в разные последовательные моменты времени. Видно, что в движениях воздуха внутри помещения количество мелких неоднородностей (с размерами менее фиксированного минимального диаметра каждого вихря) невелико. Малое количество мелких вихрей обычно проявляется в быстром убывании спектра турбулентности на высоких частотах [1–3].

Наличие протяженных неоднородно нагреваемых поверхностей помещения, обусловленных температурными градиентами (в данном случае – с линейной зависимостью), как следует ожидать, может привести к появлению множества вихрей с разными близкими частотами и размерами. В свою очередь, как известно [8, 9, 11, 12], это может быть причиной появления (непродолжительного) участка  $5/3$ -степенной колмогоровской зависимости в спектре турбулентности.

### 1.4. Спектральный анализ

На рис. 1.7 показаны рассчитанные временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$  в заданных точках: P01–P06 (см. рис. 1.1, цв. вклейка).

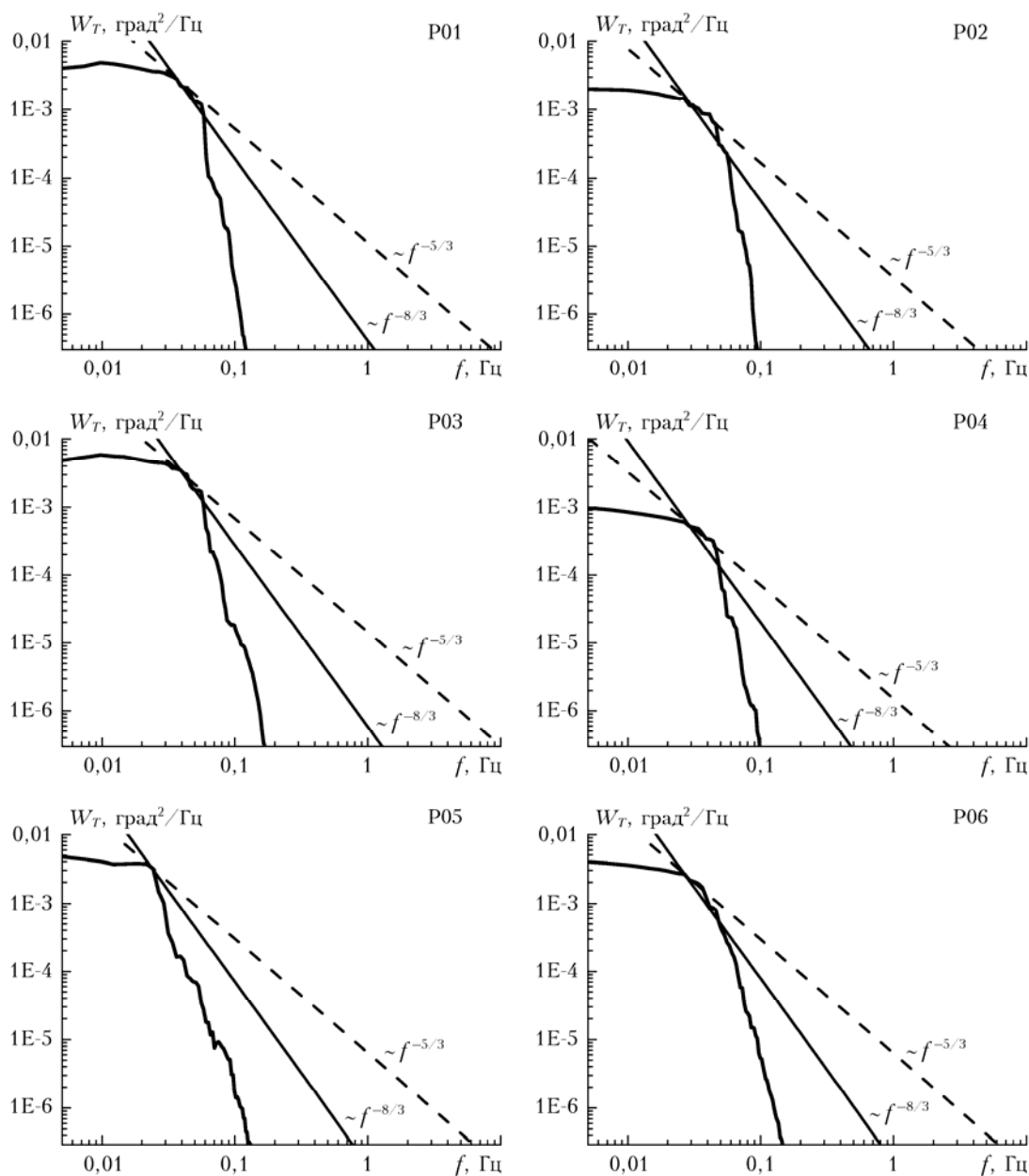


Рис. 1.7. Временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$

Как видно, наличие неоднородно нагреваемых поверхностей, обусловленных линейно убывающими температурными градиентами, приводит к тому, что в точках наблюдения в расчетном спектре флуктуаций температуры  $W_T$  имеется небольшой 5/3-степенной участок убывания спектра с дальнейшим более быстрым убыванием на высоких частотах.

## 2. Сценарий № 2

### 2.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента сформулирована следующая краевая задача.

– Для модели помещения (рис. 2.1, цв. вклейка) заданы размеры (ш × в × г): 8 × 8 × 8 м.

– Граничные условия Дирихле:

температуры поверхностей помещения:  $T_{\min} = 293 \text{ К}$  ( $\approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $T_{\max} = 293,5 \text{ К}$ ;  $T_{\text{левая стенка}} = T_{\text{верхняя стенка}} = T_{\text{правая стенка}} = T_{\text{задняя стенка}} = T_{\text{передняя стенка}} = T_{\min}$ ;  $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\max}$ ; скорости на границах помещения:  $U = V = W = 0$ .

– Начальные условия внутри помещения:  $T_0 = T_{\min}$ ;  $p_0 = 1013,25 \text{ мбар}$ .

Внутри помещения подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Внутри помещения присутствуют крупногабаритные оптические элементы и конструкции (рис. 2.2, цв. вклейка) астрономического телескопа с большой приемной апертурой.

Схема расположения точек измерения параметров около элементов конструкции телескопа приведена на рис. 2.3 и 2.4 (цв. вклейка). Нумерация точек – последовательная в соответствии с оптической схемой: P01 – около главного зеркала, P06 – около плоского эталонного зеркала для автоколлимационного режима.

Физическая интерпретация заданных граничных условий:

– кубическое помещение непрерывно нагревается со стороны нижней грани, при этом температура поверхности нижней грани постоянна и составляет  $T_{\max}$ ;

– остальные грани помещения имеют постоянную температуру  $T_{\min}$ ;

– элементы конструкции телескопа имеют начальную температуру  $T_{\min}$ .

### 2.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха в помещении в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 2.5, цв. вклейка).

Как видно из рис. 2.5–2.9 (цв. вклейка), внутри помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Совместно эти вихри можно интерпретиро-

вать как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом прямоугольном объеме.

На рис. 2.10–2.13 (цв. вклейка) представлены фрагменты картины движения воздуха вокруг элементов телескопа. Фрагмент картины движения воздуха вокруг главного зеркала приведен на рис. 2.14 (цв. вклейка). Вертикальное сечение главного зеркала позволяет увидеть линии тока в непосредственной близости к нему.

### 2.3. Эволюция конвективных ячеек

На рис. 2.15 (цв. вклейка) представлены картины движения воздуха внутри помещения в разные последовательные моменты времени. Рис. 2.15 показывает преобладающее влияние крупных неоднородностей в движениях воздуха внутри помещения. Незначительность вклада мелких вихрей должна проявиться в более быстром убывании спектра турбулентности на высоких частотах.

### 2.4. Спектральный анализ

На рис. 2.16 представлены рассчитанные временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$  в точках P01–P06.

Как видно, в заданных точках наблюдения расчетный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  имеет небольшой 8/3-степенной участок убывания спектра с последующим более быстрым убыванием на высоких частотах. Такой спектр соответствует когерентной турбулентности.

## 3. Сценарий № 3

### 3.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента сформулирована следующая краевая задача.

– Для модели помещения (рис. 3.1, цв. вклейка) заданы размеры (ш × в × г): 22 × 22 × 22 м.

– Граничные условия Дирихле:

заданные температурные градиенты на поверхностях:  $\nabla T_{\text{вертик}} = 0,005 \text{ К}/\text{м}$ . Температуры поверхностей помещения:  $T_{\min} = 293 \text{ К}$  ( $\approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $T_{\max} = 293,11 \text{ К}$ ;  $T_{\text{нижняя стенка}} = T_{\max}$ ;  $T_{\text{боковые стенки}}(y) = T_{\max} - \nabla T_{\text{вертик}} \cdot y$ , где  $y$  – вертикальная координата-высота, м. Скорости на границах помещения:  $U = V = W = 0$ .

– Начальные условия внутри помещения:  $T_0 = T_{\min}$ ;  $p_0 = 1013,25 \text{ мбар}$ .

Внутри помещения подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Внутри модели помещения присутствуют элементы конструкции крупноапертурного телескопа (набор оптических зеркал) (рис. 3.2, цв. вклейка).

Схема расположения точек измерения параметров около элементов конструкции телескопа приведена на рис. 3.3 и 3.4 (цв. вклейка). Нумерация точек –

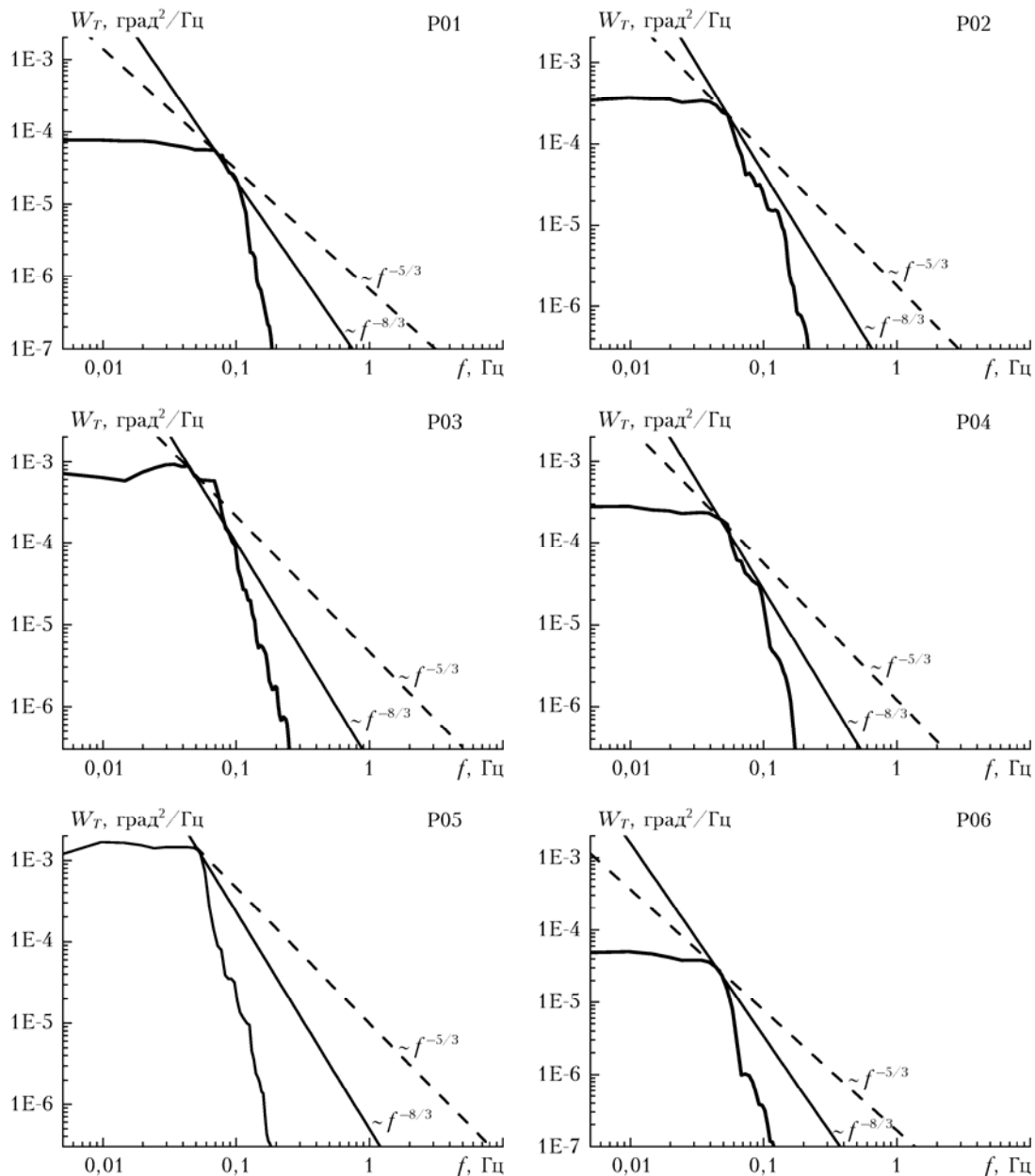


Рис. 2.16. Временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$

последовательная в соответствии с оптической схемой: P01 — около главного зеркала, P06 — около плоского эталонного зеркала для автоколлимационного режима.

Физическая интерпретация заданных граничных условий:

- кубическое помещение непрерывно нагревается со стороны нижней грани, при этом температура поверхности нижней грани постоянна и составляет  $T_{\max}$ ;

- вертикально вверх вдоль всех боковых граней температура поверхностей помещения линейно уменьшается от максимума температуры ( $T_{\max}$ ) согласно заданному градиенту  $\nabla T_{\text{вертик}} = 0,005 \text{ К/м}$ , что составляет на 22 м величину падения температуры  $\Delta T = 0,11 \text{ К}$  ( $22 \text{ м} \times 0,005 \text{ К/м}$ ) и приводит

- к значению температуры  $T_{\min}$  на верхней грани помещения (потолок);

- верхняя грань помещения имеет постоянную температуру  $T_{\min}$ ;

- элементы конструкции телескопа имеют начальную температуру  $T_{\min}$ .

### 3.2. Моделирование

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха в помещении в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 3.5, цв. вклейка).

Как видно из рис. 3.5–3.9 (цв. вклейка), внутри помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические со-

литоны). Совместно эти вихри можно интерпретировать как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом прямоугольном объеме.

На рис. 3.10–3.13 (цв. вклейка) представлены фрагменты картины движения воздуха вокруг элементов телескопа. Фрагмент картины движения воздуха вокруг главного зеркала приведен на рис. 3.14 и 3.15 (цв. вклейка). Вертикальное сечение главного зеркала позволяет увидеть линии тока в непосредственной близости к нему.

### 3.3. Эволюция конвективных ячеек

На рис. 3.16 (цв. вклейка) представлены картины движения воздуха внутри помещения в разные последовательные моменты времени. Из рис. 3.16 видно, что в движениях воздуха внутри помещения количество мелких неоднородностей (с размерами менее фиксированного минимального диаметра круп-

ных вихрей) незначительно. Заметно доминирующее влияние крупных неоднородностей. Небольшой вклад мелких вихрей, как можно ожидать, должен проявиться более быстрым убыванием спектра турбулентности в высокочастотной области.

В то же время наличие протяженных неоднородно нагреваемых поверхностей помещения, обусловленных линейно меняющимися температурами поверхностей, способно привести к появлению большого количества вихрей с разными частотами и размерами. Как следует ожидать, это может найти свое отражение в появлении участка  $5/3$ -степенной колмогоровской зависимости в спектре турбулентности.

### 3.4. Спектральный анализ

На рис. 3.17 показаны рассчитанные временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$  в заданных точках: P01–P06.

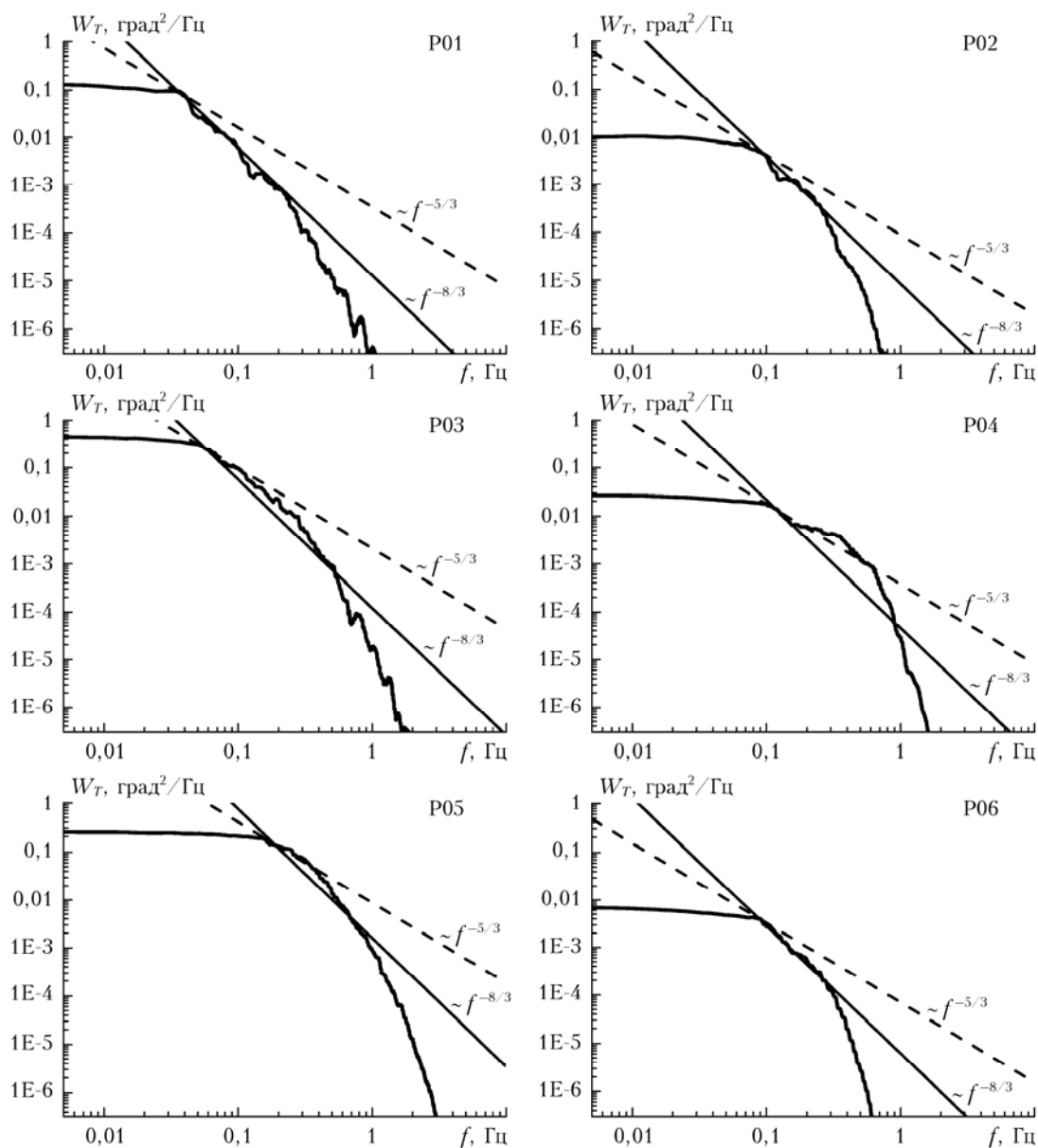


Рис. 3.17. Временные частотные спектры флуктуаций температуры  $W_T$

Известно [9–11], что при обтекании препятствий, вследствие постоянной генерации крупных ячеек и переноса продуктов их распада внешним течением, непосредственно за препятствиями течения обеднены мелкими вихрями. Поэтому сразу за препятствием спектр флуктуаций соответствует когерентной турбулентности.

В данном случае точка P01 расположена непосредственно над главным зеркалом или, учитывая, что конвективные воздушные потоки поднимаются вверх, — на его «подветренной» стороне. Следовательно, указанная точка находится сразу за препятствием — главным зеркалом, что является причиной [9–11] наличия сравнительно протяженного когерентного  $8/3$ -участка в спектре турбулентности.

В точках P01, P03, P05 отмечается интенсивность флуктуаций, более чем на порядок превышающая интенсивность в точках P02, P04, P06. В силу нахождения точек с нечетными номерами с «подветренной» стороны зеркал интенсивность распада вихрей в этих точках выше в сравнении с «наветренной» стороной зеркал.

Меньшая интенсивность флуктуаций температуры в точках P02 и P06 в сравнении с остальными точками объясняется в том числе и их удаленностью от главного зеркала — основного препятствия, являющегося причиной появления когерентных вихрей вследствие его обтекания (с последующим их распадом).

Протяженные неоднородно нагреваемые поверхности помещения вследствие их линейно меняющихся температур приводят к появлению вихрей с разными частотами и поперечными размерами. Это отражается в появлении небольшого участка  $5/3$ -степенной колмогоровской зависимости в спектре турбулентности практически во всех заданных точках. Дальнейшее более быстрое убывание спектра в области очень высоких частот обусловлено обедненностью мелкими вихрями.

## Заключение

1. Представлены результаты численных решений уравнений Навье—Стокса в специализированных помещениях крупных астрономических телескопов, без обмена веществом среды на границах. Рассмотрены три сценария с разным типом нагрева поверхностей помещений и присутствием различных оптических элементов телескопов.

2. Во всех исследованных сценариях наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Каскадный распад таких вихрей проявляется в виде когерентной турбулентности.

3. 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 в воздухе обычно за период от 1 мин до десятков минут.

4. В случае неоднородно нагреваемых протяженных поверхностей специализированных помещений (на границах объема) в спектре турбулентности присутствуют небольшие участки, характеризующиеся колмогоровской  $5/3$ -степенной зависимостью.

5. Проведенное моделирование подтверждает сформулированный нами ранее экспериментальный вывод [8, 9, 12], что смешивание многих когерентных структур с разными близкими размерами (и с близкими частотами главных вихрей) дает некогерентную колмогоровскую турбулентность.

6. Наличие в помещении массивных конструкций, в частности протяженных горизонтально ориентированных оптических зеркал, влияющих (как препятствия) на конвективное перемещение воздушных масс, создает известный [10, 11] эффект постоянной генерации крупных ячеек и переноса продуктов их распада вследствие обтекания потоками таких препятствий. Это приводит к тому, что сразу за препятствиями спектр флуктуаций соответствует когерентной турбулентности. С «подветренной» стороны препятствий (зеркал) интенсивность распада гидродинамических ячеек выше в сравнении с «наветренной» стороной.

7. Вследствие обедненности мелкомасштабными неоднородностями когерентной турбулентности, наблюдаемой в специализированных помещениях астрономических телескопов, в соответствии с данными наших работ [8, 9] следует ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения, принимаемого астрономическим телескопом.

Авторы выражают признательность Stéphane Porinet 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.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-05-05404.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Nosov V. V., Grigoriev V. M., Kovadlo P. G., Lukin V. P., Papishev 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.
5. 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.

6. *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.
7. *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 / Ed. by A.B. Nadycto et al. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. Ch. 20. P. 297–330.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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 Collapses and Turbulence: Achievements Developments and Perspectives». Novosibirsk, 2012. P. 108–109.
12. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Моделирование когерентных структур (топологических солитонов) в закрытых помещениях путем численного решения уравнений гидродинамики // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 120–133.
13. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2002–2014. URL: <http://gfs.sf.net>
14. *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>

***V. V. Nosov, V. P. Lukin, E. V. Nosov, A. V. Torgaev.* Structure of air motion along optical paths inside specialized rooms of astronomical telescopes. Numerical simulation.**

Structure of air turbulent motion inside large specialized rooms of astronomical telescopes has been studied by numerical solving of several boundary value problems for hydrodynamics equations (Navier–Stokes). There are optical elements of large-aperture telescopes inside such rooms. The main attention is devoted to closed rooms with different heating the upper and lower surfaces without exchange of internal and external medium through the borders. This enables the testing under steady state conditions of the optical characteristics of astronomical telescopes including their resolution. In particular, a visualization of the air flow motion by streamlines allows one to analyze the impact of design features of telescope and the temperature regime of its optical elements.

Results of our numerical simulations demonstrate that the solitary large vortices (coherent structures, topological solitons) are observed inside specialized rooms. The cascade decay of such vortices leads to the coherent turbulence. The simulations confirm our previously experimentally stated conclusion that the mixing of coherent structures of different close-by sizes (and close-by frequencies of major vortices) results in the non-coherent Kolmogorov turbulence.



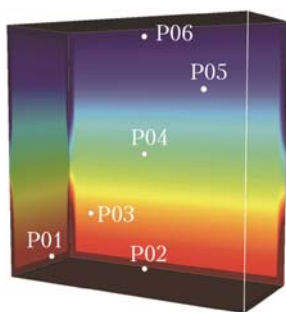


Рис. 1.1. Модель помещения со схемой расположения точек измерения параметров. Вид спереди справа. Ближние грани не показаны. Красный цвет —  $T_{\max}$ , синий цвет —  $T_{\min}$

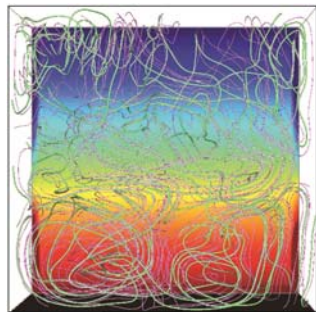


Рис. 1.2. Картина движения воздуха внутри помещения. Вид сверху. Ближние грани не показаны. Сплошные линии — линии тока

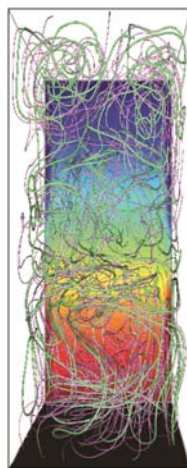


Рис. 1.3. То же, что и на рис. 1.2. Вид слева

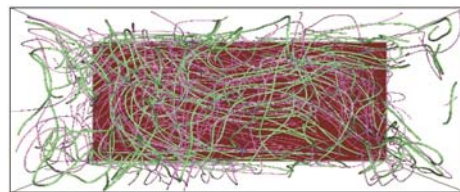


Рис. 1.4. То же, что и на рис. 1.2. Вид сверху

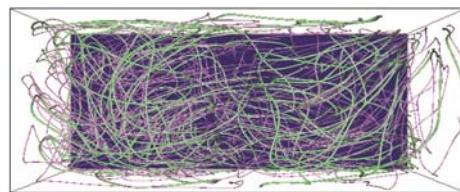


Рис. 1.5. То же, что и на рис. 1.2. Вид снизу

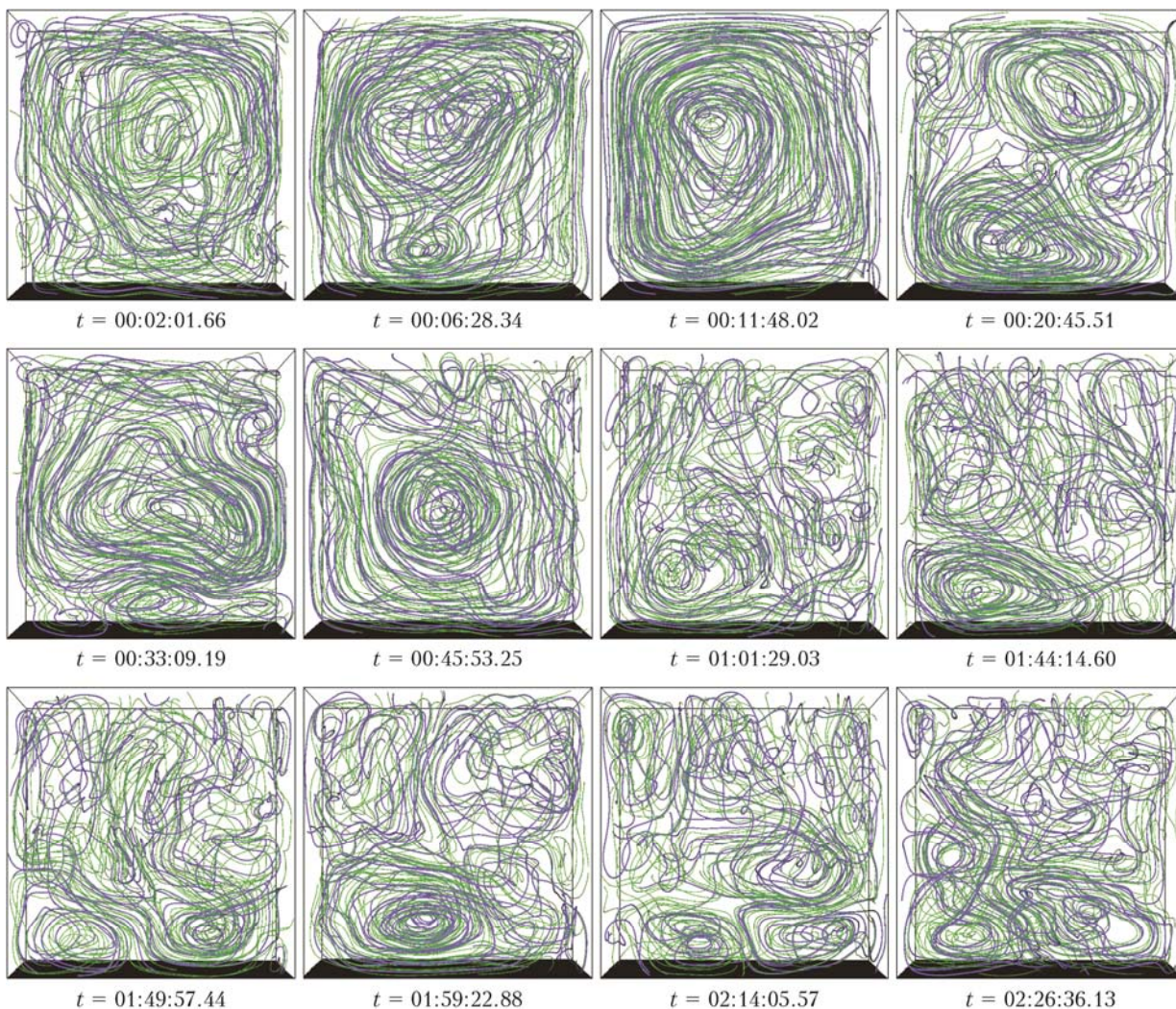


Рис. 1.6. Картины движения воздуха внутри помещения в разные моменты времени. Вид спереди. Боковые стенки не показаны. Сплошные линии — линии тока. Под каждым рисунком приведено соответствующее время внутри модели (в формате ч: мин: с. доли с)



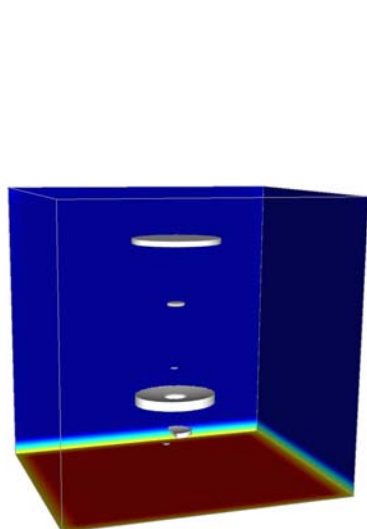


Рис. 2.1. Модель помещения. Вид спереди сверху слева. Ближние грани не показаны. Красный цвет –  $T_{\max}$ , синий цвет –  $T_{\min}$

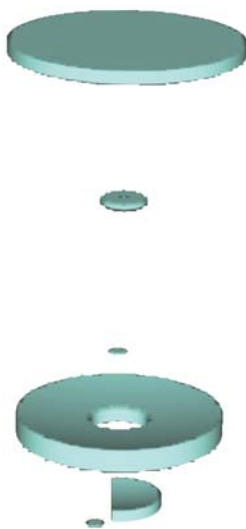


Рис. 2.2. Фрагмент модели – элементы конструкции телескопа. Вид спереди сверху

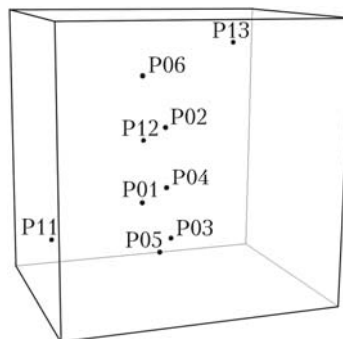


Рис. 2.3. Схема расположения точек измерения параметров. Грани и элементы конструкции телескопа не показаны

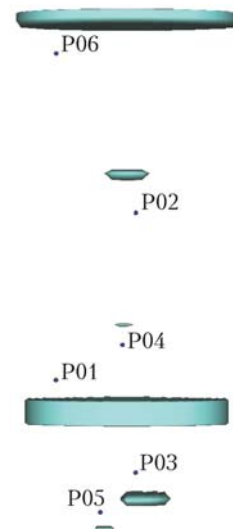


Рис. 2.4. Схема расположения точек измерения параметров около элементов конструкции телескопа. Вид спереди

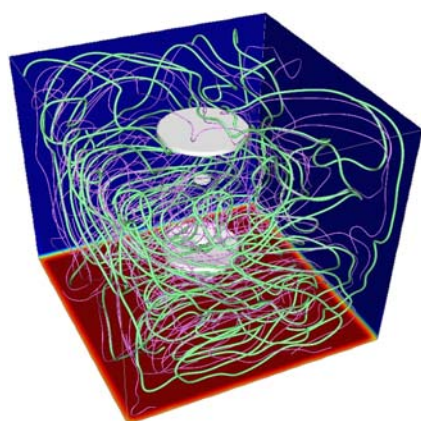


Рис. 2.5. Картина движения воздуха внутри помещения. Вид спереди сверху слева. Ближние грани не показаны. Сплошные линии – линии тока

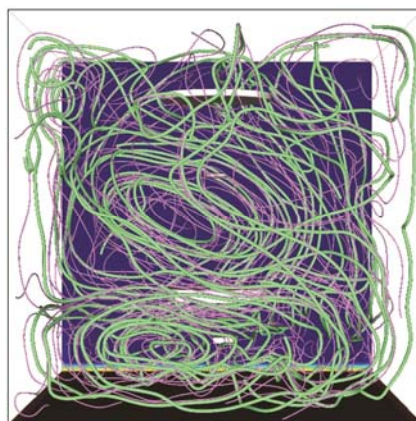


Рис. 2.6. То же, что и на рис. 2.5. Вид спереди

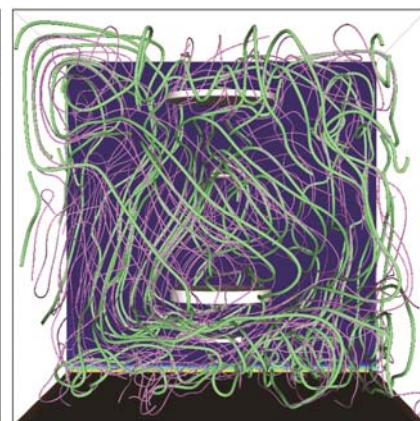


Рис. 2.7. То же, что и на рис. 2.5. Вид слева

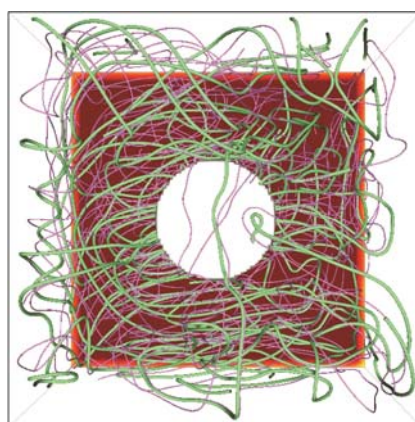


Рис. 2.8. То же, что и на рис. 2.5. Вид сверху

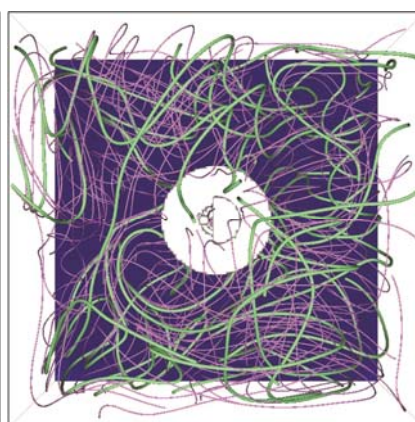


Рис. 2.9. То же, что и на рис. 2.5. Вид снизу

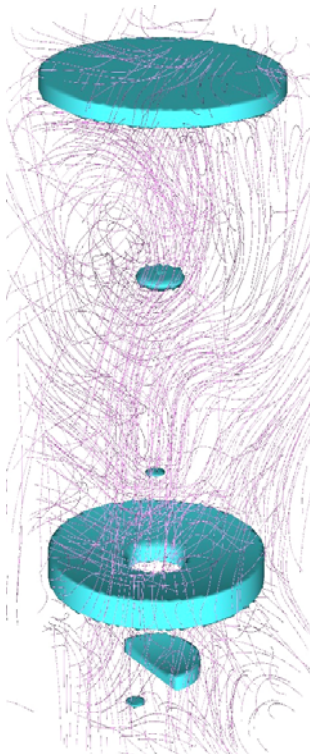


Рис. 2.10. Фрагмент картины движения воздуха вокруг элементов телескопа. Вид спереди сверху слева. Сплошные линии – линии тока

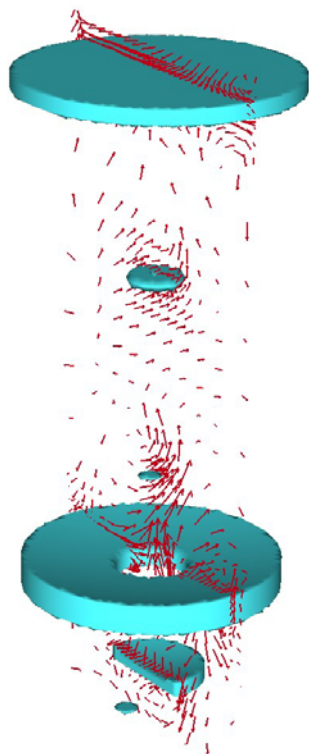


Рис. 2.11. То же, что и на рис. 2.10. Вид спереди сверху слева. Стрелки – вертикальное сечение поля скоростей



Рис. 2.12. То же, что и на рис. 2.10. Вид спереди

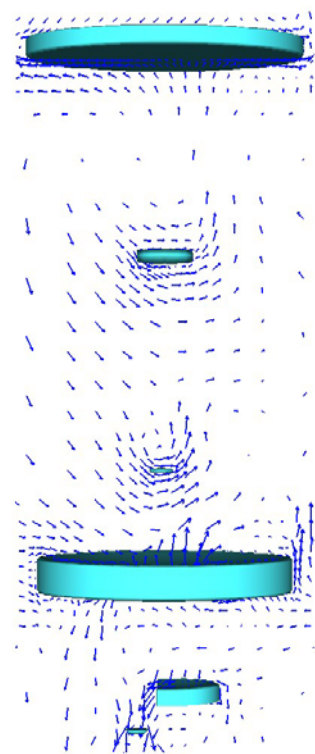


Рис. 2.13. То же, что и на рис. 2.11. Вид спереди

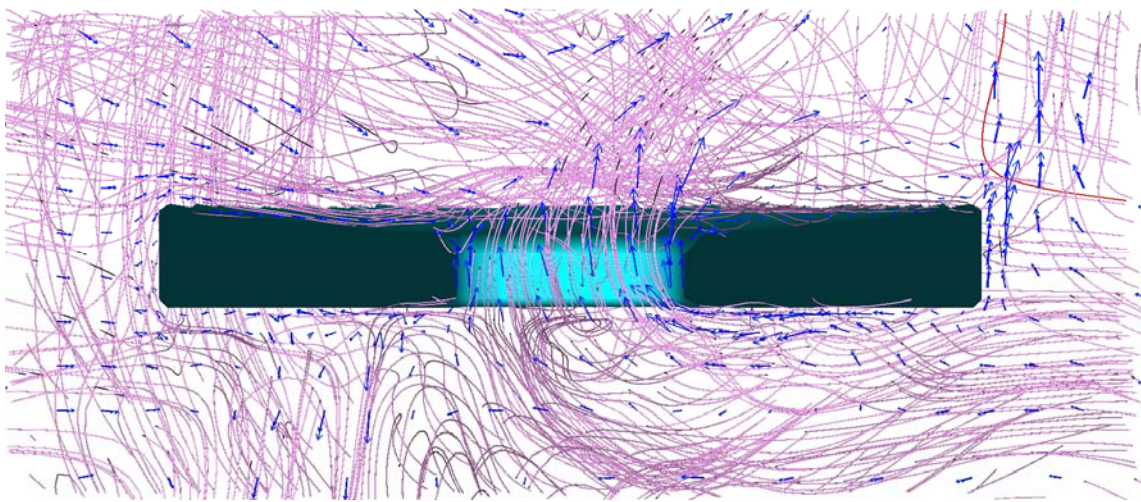


Рис. 2.14. Фрагмент картины движения воздуха вокруг главного зеркала. Вид спереди. Вертикальное сечение главного зеркала. Сплошные линии – линии тока. Стрелки – вертикальное сечение поля скоростей



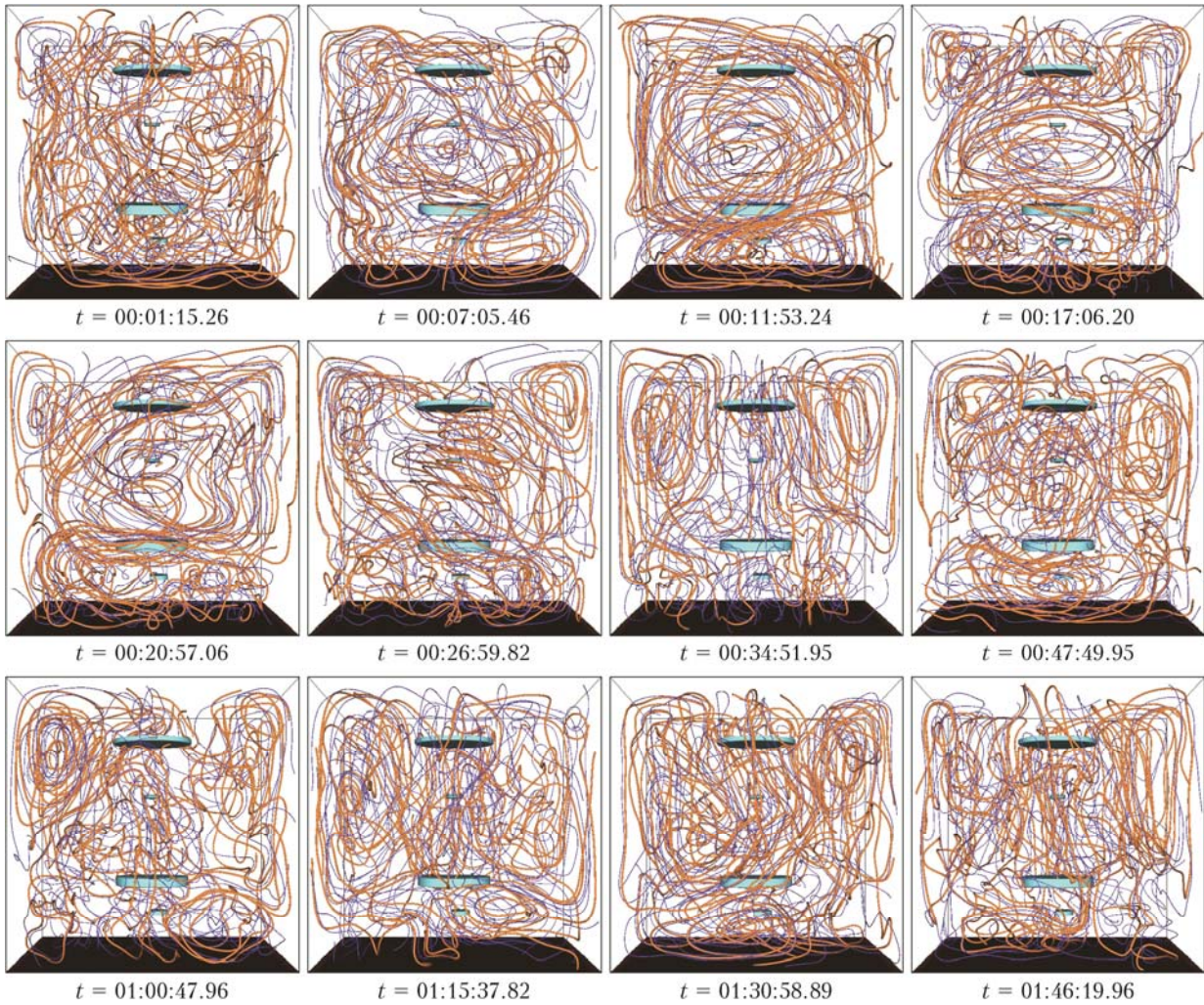


Рис. 2.15. Картины движения воздуха внутри помещения в разные моменты времени. Вид спереди. Боковые стенки не показаны. Сплошные линии – линии тока. Под каждым рисунком приведено соответствующее время внутри модели

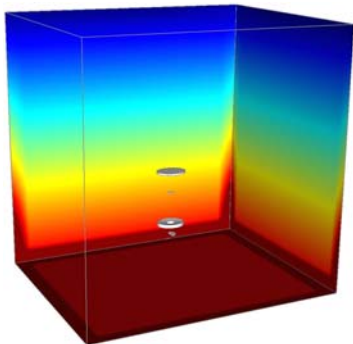


Рис. 3.1. Модель помещения. Вид спереди слева. Ближние грани не показаны. Красный цвет –  $T_{max}$ , синий цвет –  $T_{min}$

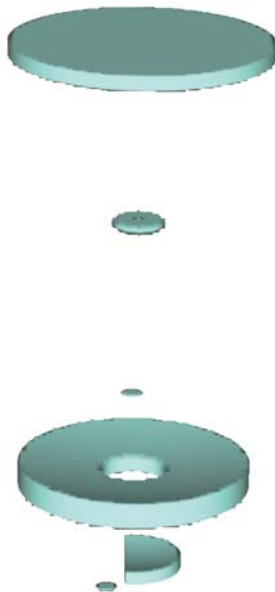


Рис. 3.2. Фрагмент модели – элементы конструкции телескопа. Вид спереди сверху

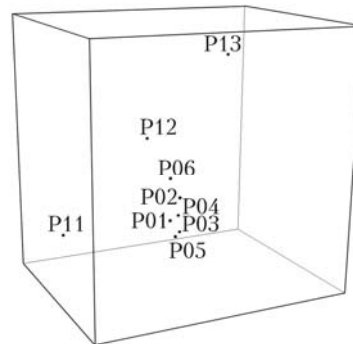


Рис. 3.3. Схема расположения точек измерения параметров. Вид спереди слева. Грани и элементы конструкции телескопа не показаны

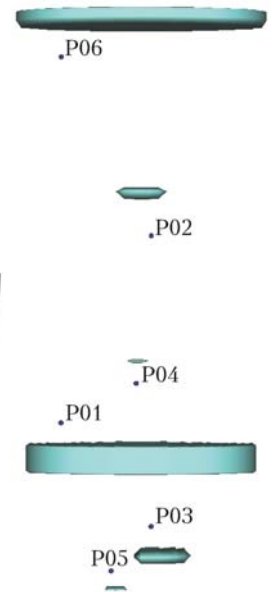


Рис. 3.4. Схема расположения точек измерения параметров около элементов конструкции телескопа. Вид спереди



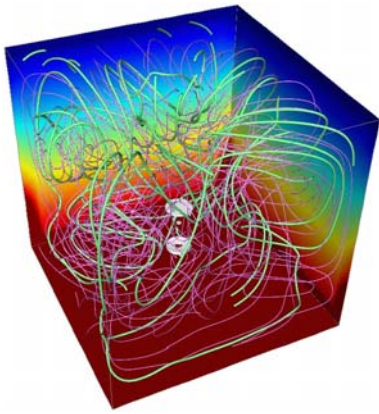


Рис. 3.5. Картина движения воздуха внутри помещения. Вид спереди сверху слева. Ближние грани не показаны. Сплошные линии — линии тока

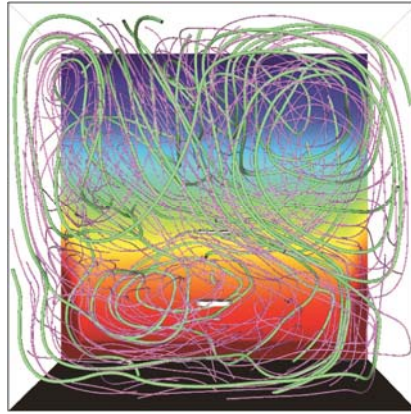


Рис. 3.6. То же, что и на рис. 3.5. Вид спереди

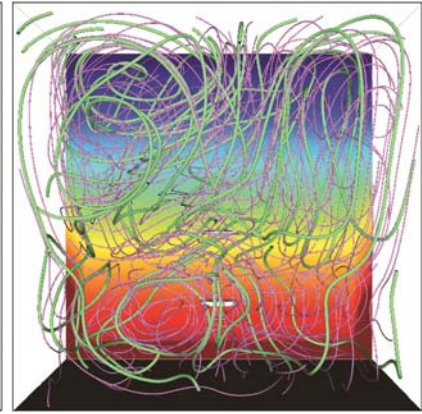


Рис. 3.7. То же, что и на рис. 3.5. Вид слева

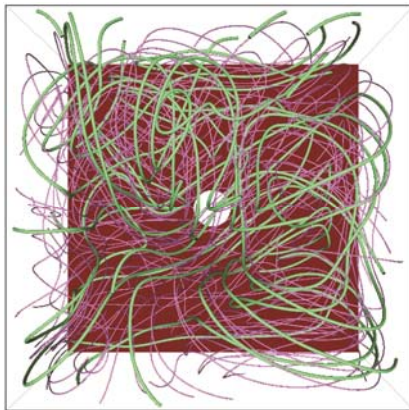


Рис. 3.8. То же, что и на рис. 3.5. Вид сверху

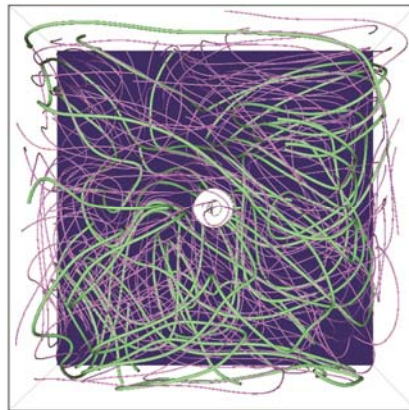


Рис. 3.9. То же, что и на рис. 3.5. Вид снизу



Рис. 3.10. Фрагмент картины движения воздуха вокруг элементов рис. 3.10. Вид спереди сверху слева. Стрелки — вертикальные сечение поля скоростей

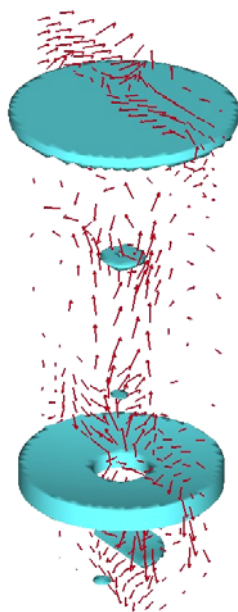


Рис. 3.11. То же, что и на рис. 3.10. Вид спереди сверху



Рис. 3.12. То же, что и на рис. 3.10. Вид спереди

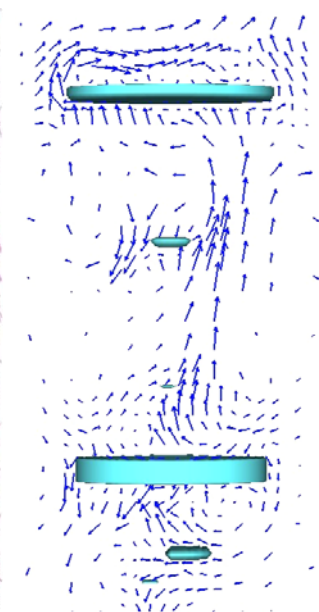


Рис. 3.13. То же, что и на рис. 3.11. Вид спереди



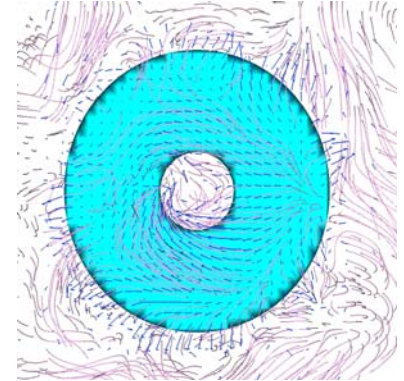
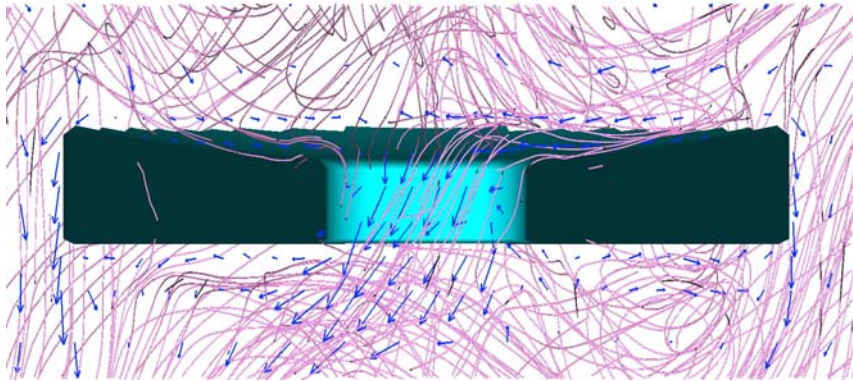


Рис. 3.14. Фрагмент картины движения воздуха вокруг главного зеркала телескопа. Вид спереди. Вертикальное сечение главного зеркала. Сплошные линии – линии тока. Стрелки – вертикальное сечение поля скоростей

Рис. 3.15. То же, что и на рис. 3.14. Вид сверху. Стрелки – горизонтальное сечение поля скоростей

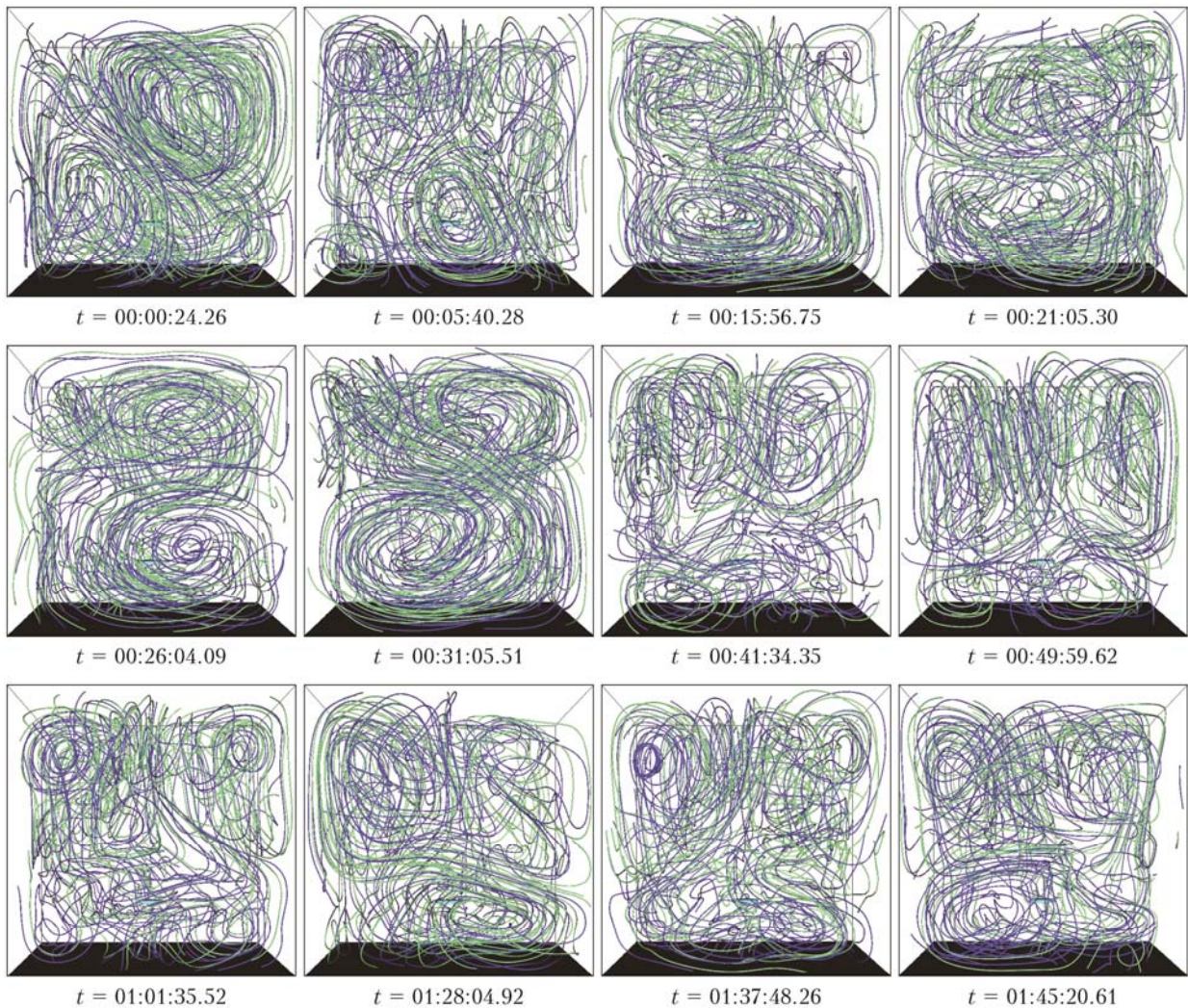


Рис. 3.16. Картины движения воздуха внутри помещения в разные моменты времени. Вид спереди. Боковые стенки не показаны. Сплошные линии – линии тока. Под каждым рисунком приведено соответствующее время внутри модели