

Визуализация свободно-конвективных течений жидкости в полости

Алексей Гудзовский
Институт автоматизации проектирования РАН
Москва, Россия

Станислав Клименко^o
Институт системного программирования РАН
Москва, Россия

Аннотация

Выполненные к настоящему времени работы по визуализации течения жидкости (газа), как правило, ограничены визуализацией течений с общей структурой простого типа в виде однонаправленного потока. Развитые в них методы не обеспечивают понятную и информативную визуализацию течений жидкости в объеме, которые характеризуются изменчивой пространственно-временной структурой. Решение этой фундаментальной проблемы научной визуализации трудно представимых течений достижимо путем выделения структурных элементов течения и анимации.

В работе рассмотрено течение такого рода, которое имеет место при свободной конвекции жидкости (воды или воздуха) в полости с локальным теплообменом на горизонтальных поверхностях. Обсуждаются методические приемы построения выразительного изображения в кадре для передачи движения жидкости в объеме полости.

Ключевые слова: изображение течения жидкости, анимация, свободная конвекция.

1. ВВЕДЕНИЕ

Анимация расчетных данных, оформленных в графическом виде, широко используется в вычислительной гидродинамике для представления результатов расчетов нестационарных течений. Использование анимации позволяет наглядно представлять изменения во времени полей характеристик течения, а также процессы структурных изменений (например, образование отрыва или формирование термика). Как правило, анимация выполняет операцию своего рода сжатия временного ряда изображений в “живую картинку”.

При всей внешней привлекательности анимации, ее редко используют как *инструмент* научных исследований. Это связано не только с известной трудоемкостью метода, но и с тем, что анимация не всегда дает новую информацию, которая не содержится в отдельных кадрах и не исчерпывается ими. Иными словами, анимация есть просто удобная форма подачи материала, выстроенного в определенной временной последовательности. В этом случае изображение на

кадрах конструируется по правилам создания отдельной статической иллюстрации, воспринимаемой в отрыве от остальных кадров.

Однако возможен иной подход, при котором изображение кадра строится так, что каждый из них, взятый в отдельности, может проигрывать в выразительности подачи информации статическому кадру, однако фильм в целом лучше передает основные особенности процессов в системе.

Форма представления информации при анимации может быть отлична от таковой для статических кадров подобно тому, как построение кадра кинофильма отлично от построения фотокadra. Дело в том, что условия видения человеком этих кадров существенно отличаются предоставленным ему временем. Статический кадр может наблюдаться неограниченно долго, поэтому построение всех его элементов должно предполагать возможность долгого разглядывания. Иными словами статический кадр должен быть “вылизан” весь, целиком. Динамический кадр человек может разглядывать весьма ограниченное время. Поэтому в нем только небольшая по площади, но важнейшая по замыслу создателя часть кадра должна быть подготовлена так, чтобы притягивать взор. Остальную часть кадра уместно приглушить, сделать не привлекающей внимание. В этом случае внимание зрителя намеренно концентрируется на определенной части кадра. “Ведя” таким образом зрителя, можно управлять процессом восприятия и более эффективно передавать ему мысль создателя фильма.

В настоящей работе этот прием использован при визуализации свободно-конвективного течения внутри полости с локальным теплообменом на горизонтальных поверхностях. Течение в схожих условиях рассмотрено в работе [1], где установлено, что для него характерно наличие множества различных стационарных режимов течения, реализуемых из состояния покоя при одинаковых граничных условиях, но разной начальной температуре в полости. Последующее изучение течения в полости с локальным теплообменом, заполненной воздухом или водой, показало, что при больших числах Грасгофа может реализоваться несколько различных автоколебательных режимов при одинаковых фиксированных граничных условиях [2]. Визуализация течения стала действенным инструментом понимания факта существования в одинаковых внешних условиях нескольких автоколебательных движений жидкости,

отличающихся периодом и амплитудой колебаний, а также типом течения.

Некоторые из этих режимов имеют неизменные пространственно-временные структуры (ПВС), что обеспечивает их исчерпывающий анализ традиционными методами (например, путем построения статический изображений векторов скорости и изолиний температуры в плоских сечениях расчетной области). Другие столь сложны, что для формирования представления о ПВС течения требуется привлечение анимации.

Работа построена следующим образом. Вначале в п.2 дается описание гидродинамической задачи о свободной конвекции несжимаемой жидкости в каверне с локальным теплообменом на горизонтальных поверхностях. В п.3 обсуждаются используемые в работе технические приемы построения изображения в кадре. В п.4 кратко описываются два автоколебательных режима, характеризующихся неизменной ПВС течения, для анализа которых можно не привлекать анимацию. В п.5 рассмотрены два автоколебательных режима, в которых ПВС течения не может быть понята без привлечения анимации.

2. ЗАДАЧА О СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Рассмотрим плоское течение несжимаемой жидкости (воздуха или воды) в изображенной на рис. 1 полости высотой H и шириной $0.5H$ [2]. На верхней и нижней сторонах полости на расстоянии $0.2H$ от боковых сторон располагаются два изотермических участка Γ_u и Γ_d длиной $0.1H$, остальные границы полости теплоизолированы. Температура участка на нижней стороне T_d выше температуры участка на верхней T_u .

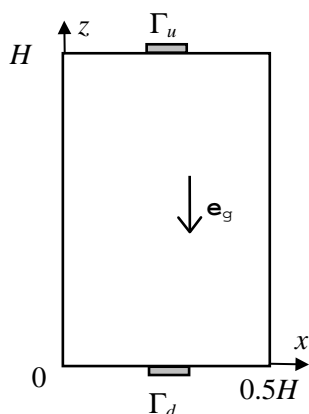


Рис. 1. Полость с локальным теплообменом на горизонтальных сторонах.

Свободно-конвективное течение описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска [3]

$$\nabla U = 0;$$

$$\frac{dU}{dt} = -\nabla P + G r_H^{-1/2} \Delta U + \Theta e_g; \quad (1)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = P r_H r_H^{-1/2} \Delta \Theta$$

где $P = p/\rho_0$. Уравнения (1) приведены к безразмерному виду отнесением переменных к характерным масштабам длины $L_{ref}=H$ и скорости $U_{ref} = (\mathfrak{g} \delta T H)^{1/2}$.

На границе расчетной области Γ ставятся условия прилипания и равенства теплового потока нулю везде, кроме участков Γ_d и Γ_u

$$\begin{aligned} U|_{\Gamma} &= 0; \quad \Theta|_{\Gamma_d} = 0.5, \\ \Theta|_{\Gamma_u} &= -0.5, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial n}|_{\Gamma / (\Gamma_u \cup \Gamma_d)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где n - нормаль к границе.

Начальные условия - либо состояние покоя при постоянной температуре воздуха во всей полости

$$U|_{t=0} = 0, \quad \Theta|_{t=0} = \theta, \quad -0.5 \leq \theta \leq 0.5$$

либо решение, полученное при ином Gr_H .

Интегрирование (1), (2) проводится явным конечно-объемным методом аналогичным проекционному методу MAC с использованием программного комплекса *FlowVision* [4]. Результаты получены на равномерной по всем направлениям сетке с шагом $h=0.01$. Решения, полученные при контрольных расчетах на сетке с $h=0.005$, имеют ту же структуру, что и на номинальной сетке.

3. ИЗОБРАЖЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КАДРЕ

Будем исследовать течение в полости посредством анализа изображения полей скорости и температуры. Поле скорости представляется общепринятым образом - в виде черточек, длина которых пропорциональна величине скорости.

В силу особенности полиграфического воспроизведения настоящей работы поле температуры изображается оттенками серого цвета. Цветовая палитра выбрана таким образом, что белый цвет соответствует нейтральной температуре $\Theta=0$, а темно-серый - холодной и горячей жидкости при $\Theta=-0.5$ и 0.5 . Возможной путаницы в восприятии изображения можно избежать, если помнить, что от холодной изотермической площадки на верхней стороне полости отходит "язык" жидкости, имеющей низкую температуру, а от горячей площадки на нижней стороне - "язык" нагретой жидкости.

В очерченных рамках остается возможность управления выразительностью изображения, связанная

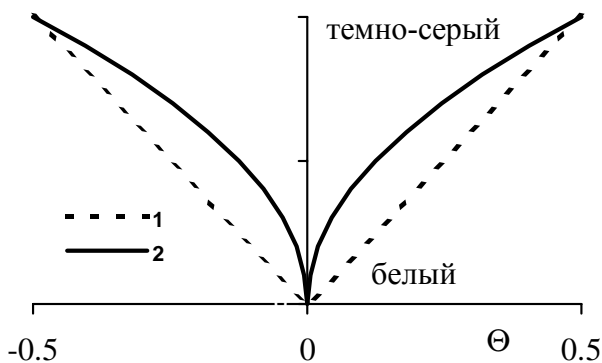


Рис. 2. Зависимость цвета от Θ .

с выбором функции отображения величины температуры в тональность серого цвета. При использовании простейшей линейной зависимости (кривая 1 на рис. 2) получаются кадры с размытыми цветовыми переходами, плохо передающие течение жидкости в полости, поскольку требуют известного напряжения на этапе интерпретации изображения.

Здесь необходимо сделать важное замечание.

При анализе течения в полости возникает проблема визуализации течения как такового, т.е. течения жидкости, в которой нет ничего кроме ее самой. Основная трудность визуализации течения как такового связана с отсутствием у человека априорных образов движущейся в объеме жидкости. Так, у нас нет зрительного образа течения воздуха в комнате или воды в бассейне. Вообще все образы, которыми оперирует человек при анализе движения какого-либо объекта, суть комбинация видимых подвижных границ. Поэтому течение жидкости или газа видимо для нас только когда мы видим перемещение в объеме пузырьков воздуха в воде, пылинок в воздухе и т.п. Иными словами, мы видим движение жидкости только через движение каких-либо поверхностей, которые мы связываем с жидкостью.

Это обстоятельство является непреодолимым ограничением нашего восприятия, вытекающим из строения наших органов чувств. Наше зрение устроено так, чтобы среда нашего обитания - атмосфера - была прозрачна, т.е. невидима для нас. Игнорирование таких ограничений при построении изображения приводит к появлению непонятных с первого взгляда объектов, т.е. объектов, которые не могут быть интерпретированы на бессознательном уровне. Подчеркнем, что запас понятных образов зависит от культуры человека и не исчерпывается изображениями, почерпнутыми из окружающей природы. Техногенными образами являются, например, вид графика функции в осях координат или изолиний функции на плоскости.

Итак, ключевым для изображения движения жидкости в объеме является такой выбор визуализируемых характеристик течения и формы их

представления в виде объектов, воспринимаемых как поверхности, который обеспечивает понимание структуры исследуемого течения. В рассматриваемом течении такой характерной поверхностью, восприятие движения которой позволяет получить представление о движении жидкости в объеме, может служить изоповерхность нейтральной температуры $\Theta=0$. Для четкого выделения в кадре границы раздела областей, занятых холодной и теплой жидкостями, связь между интенсивностью цвета и температурой выбрана нелинейной (кривая 2 на рис. 2)

$$(\text{индекс серого цвета}) - (\text{индекс белого цвета}) \sim \sqrt{|\Theta|}$$

Использование нелинейной зависимости приводит к нарочитому заострению границы между областями, занятыми теплой и холодной жидкостями. Тем самым формируется искусственное представление о наличии в объеме двух жидкостей с резкой границей раздела. В этом случае восприятие движения этой границы становится сходно наблюдению за перемещением поверхности воды в частично заполненном сосуде или движению границы раздела воды и масла.

Такое построение изображения в кадре намеренно фиксирует внимание человека на искусственно выделенной поверхности и заставляет его не видеть ничего, кроме этой поверхности. Использование этого чисто "киношного" приема позволяет добиться особой выразительности при анимации.

4. РЕЖИМЫ С НЕИЗМЕННОЙ ПВС

Решение (1), (2) показало, что в полости, заполненной водой ($Pr=7$) или воздухом ($Pr=0.7$) в интервале $10^5 \leq Gr_H \leq 10^8$ реализуются несколько автоколебательных режимов течения с различной структурой. Будем обозначать режимы символом V_k , где k - максимальное число основных вихрей в режиме.

На рис. 3 дано изображение течения в режиме V_1 с одним вихрем в полости. На протяжении всего цикла колебаний жидкость вращается в одном направлении, омывая холодную верхнюю площадку в одном направлении, в горячую нижнюю - в другом. При этом интенсивность сходящих с площадок "языков", а также скорость течения периодически изменяются.

На рис. 4 представлена кинограмма цикла автоколебаний в режиме V_2 . Структура течения в этом режиме состоит из двух разнонаправленных вихрей, расположенных один над другим.

Такая же структура течения возможна и в стационарном режиме течения. В этом случае "языки" жидкости, сходящие с изотермических площадок, совершают вращательное движение в пределах "своего" вихря. Перенос тепла от нижнего вихря к верхнему происходит посредством температуропроводности на границе вихрей. Однако при увеличении числа Gr_H , когда диффузионный механизм не может обеспечить перенос возрастающего потока тепла, граница между вихрями теряет устойчивость и

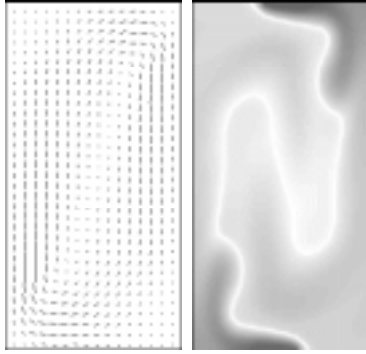


Рис. 3. Поля скорости (слева) и температуры (справа) для режима V1; течение воды при $Gr_H = 7 \cdot 10^5$.

теплоперенос осуществляется путем конвективного смешения жидкости при периодическом изменении размеров вихрей. Этот процесс и представлен на рис. 4.

Структурная неизменность рассмотренных режимов позволяет полностью описывать их с приложением минимума иллюстраций и без привлечения анимации.

5. РЕЖИМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ПВС

Следующий по сложности режим V2* изображен на рис. 5. Для него также характерно наличие в полости двух основных разнонаправленных вихрей, интенсивность которых сильно изменяется. Различие между режимами V2 и V2* связано с тем, что в

последнем затухающие по интенсивности вихри разгоняются “языками” жидкости, идущими с изотермических площадок в виде термиком.

Для формирования представления о ПВС течения в режиме V2* недостаточно изображения поля течения с двумя основными вихрями. Требуется дать еще и изображения поля температур с ярко выраженным термиком и некоторую последовательность кадров, иллюстрирующих чередование возникновения термиком на верхней и нижней сторонах полости.

На рис. 6, 7 даны кинограммы последнего из приводимых в работе автоколебательных режимов свободной конвекции воздуха в полости. Представлены кадры, относящиеся к половине периода колебания. Во время второй половины цикла течение проходит все те же стадии, только каждый кадр серии является зеркально симметричным приведенным на рис. 6, 7.

Структура течения сильно меняется на протяжении периода колебаний. Из рис. 6 видно, как мощный вихрь на первых кадрах раскручивает выше и ниже себя два вихря. В середине кинограммы все три вихря сравниваются по интенсивности, а затем периферийные вихри “рассасывают” центральный. Направления вращения обоих оставшихся вихрей совпадают и в конце кинограммы они сливаются в один вихрь. Направление его вращения противоположно направлению вращения вихря в начале кинограммы, что и предопределяет зеркальную симметрию второй половины цикла колебаний.

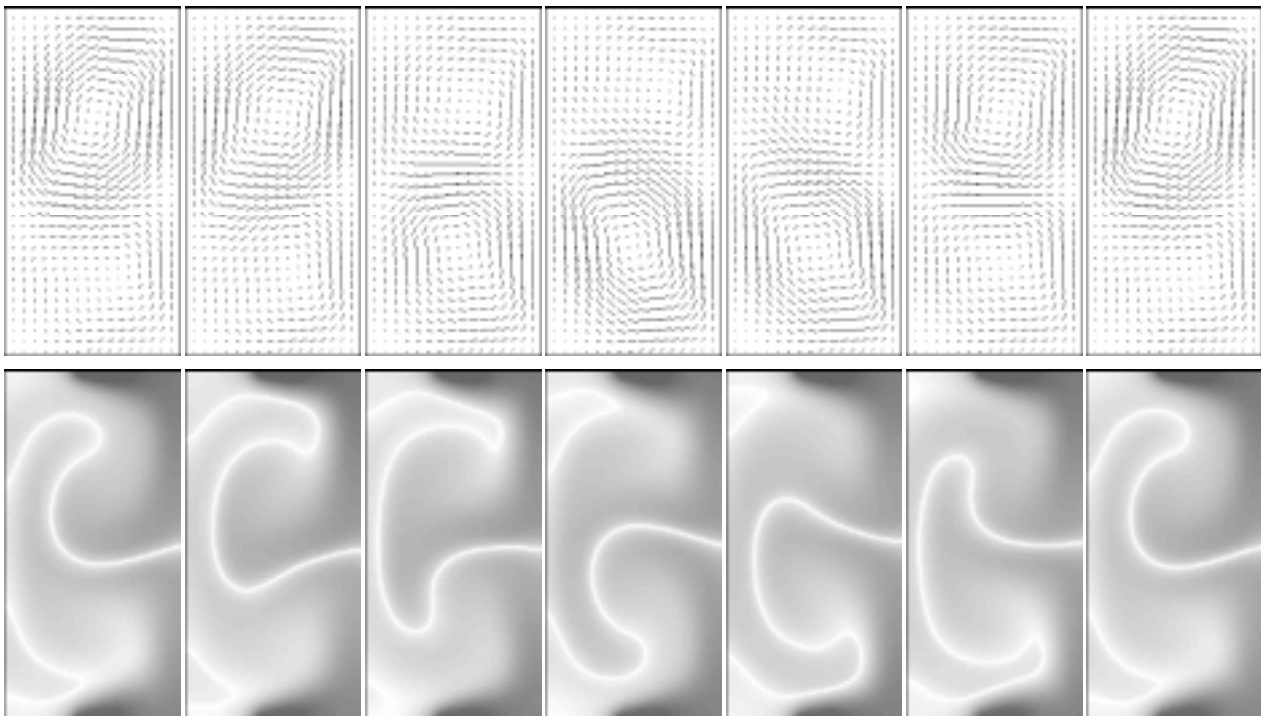


Рис. 4. Изменения полей скорости (вверху) и температуры (внизу) в течение цикла колебаний в режиме V2; течение воды при $Gr_H = 2 \cdot 10^5$.

Из рис. 6 видна динамика вихрей, однако остается открытым вопрос о причинах такого движения. Течение становится зримым из кинограммы поля температуры (рис. 7) с подчеркнутой границей раздела областей, занятых холодной и теплой жидкостями. Из рис. 7 видно, что отдельные этапы динамики вихрей связаны с определенным движением жидкости в объеме полости. Так, процесс “рассасывания” центрального вихря происходит вследствие выравнивания температуры при “переплетении” термик. Долгое сосуществование двух однонаправленных вихрей связано с прогревом нижней и охлаждением верхней частей полости. В конце этого этапа происходит обрушение холодной жидкости вниз и теплой вверх, видимое на рис. 6 как слияние двух вихрей в один.

Особого внимания достойны второй и третий кадры кинограммы на рис. 7, на которые приходится момент переключения направления вращения вихрей при достижении термиками противоположных сторон полости. Видно, как “головка” термика теплой жидкости у верхней стороны полости направляет “язык” холодной жидкости влево; одновременно противоположный по знаку процесс происходит у нижней стороны полости.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена обсуждению методов визуализации течения жидкости (газа), полностью заполняющей некоторый объем. Эта задача вызывает особые трудности в случае течения с изменчивой пространственно-временной структурой.

В работе рассмотрено свободно-конвективное течение, для визуального анализа которого эффективна анимация. Описан прием, применяемый при построении изображения в кадре фильма и обеспечивающий выразительную передачу движения жидкости в полости.

Работа частично поддержана фондом РФФИ, грант № 96-01-1273.

7. СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

U, p, T - скорость, давление, температура;

$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$ - плотность;

β, ν, k - коэффициенты объемного расширения; кинематической вязкости; температуропроводности;

g, e_g - величина и направление ускорения свободного падения;

$Gr_H = g\beta\delta T H^3 / \nu^2$ - число Грасгофа;

$Pr = \nu / k$ - число Прандтля;

$\Theta = 0.5 - (T - T_d) / \delta T, \delta T = T_d - T_u$

$T_0 = 0.5(T_d + T_u)$.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] Гудзовский А.В. О зависимости стационарных режимов свободной конвекции от начальной температуры // ДАН, 1998 (в печати).

[2] Гудзовский А.В. Автоколебательные режимы свободной конвекции в полости с локальным теплообменом на горизонтальных сторонах. - Свободная конвекция: Тр. Второй Рос. нац. конф. по теплообмену, М.: Изд-во МЭИ. 1998. (в печати).

[3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

[4] Аксенов А.А., Гудзовский А.В. Численное моделирование турбулентного теплового факела в стратифицированной среде. - Свободная конвекция: Тр. Первой Рос. нац. конф. по теплообмену, М.: Изд-во МЭИ. 1994. Т.2. С. 11-16.

Авторы:

Алексей Гудзовский, зав. сектором Института автоматизации проектирования РАН.

Адрес: 123056, Москва, 2-я Брестская, 19/18

Телефон: (095) 251-84-13

E-mail: flowvision@glas.apc.org

Станислав Клименко, зав. отделом Института системного программирования РАН.

E-mail: klimenko@mx.ihep.su

Alexey Gudzovsky, Stanislav Klimenko

Visualization of Free Convection Flows in Cavity

The free convection flows with space and time structure variability are considered. The animation is used for visual analysis of these flows. The method of production of expressive image of fluid flow is described.

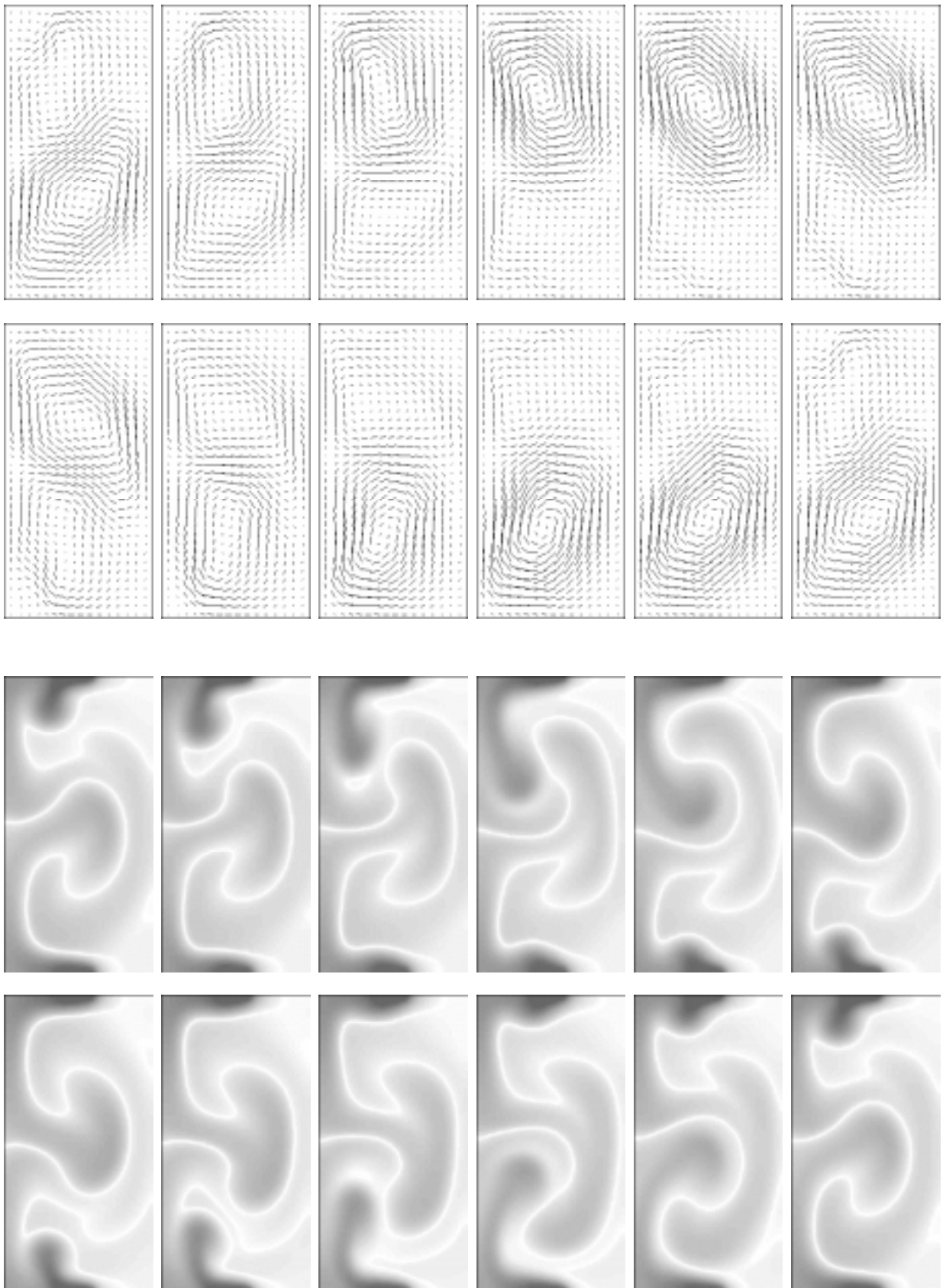


Рис.5. Изменения полей скорости (вверху) и температуры (внизу) в течение цикла колебаний в режиме V2*; течение воды при $Gr_H = 5 \cdot 10^5$.

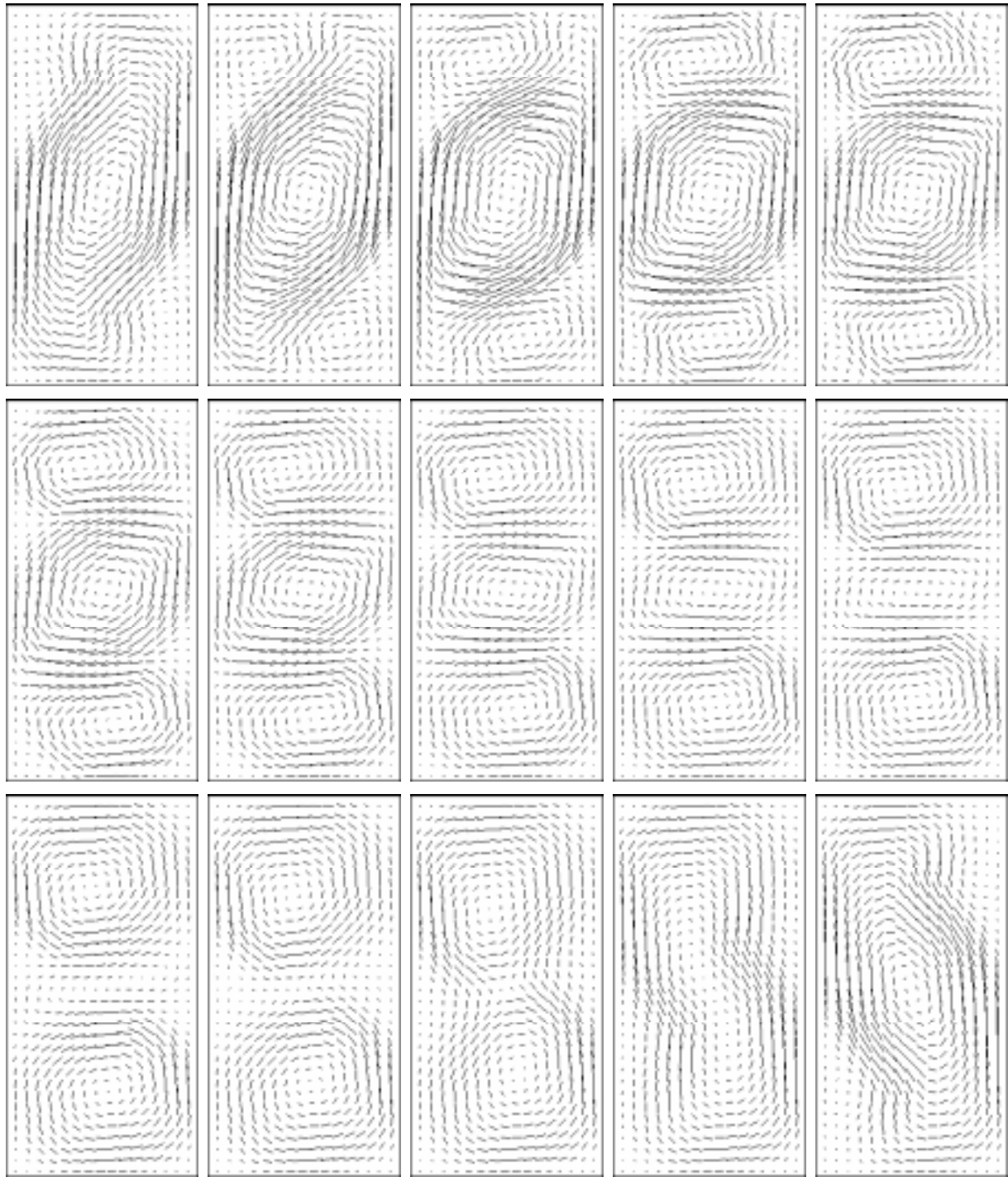


Рис. 6. Изменения полей скорости в течение полуцикла колебаний в режиме V3; течение воздуха при $Gr_H = 1 \cdot 10^7$.

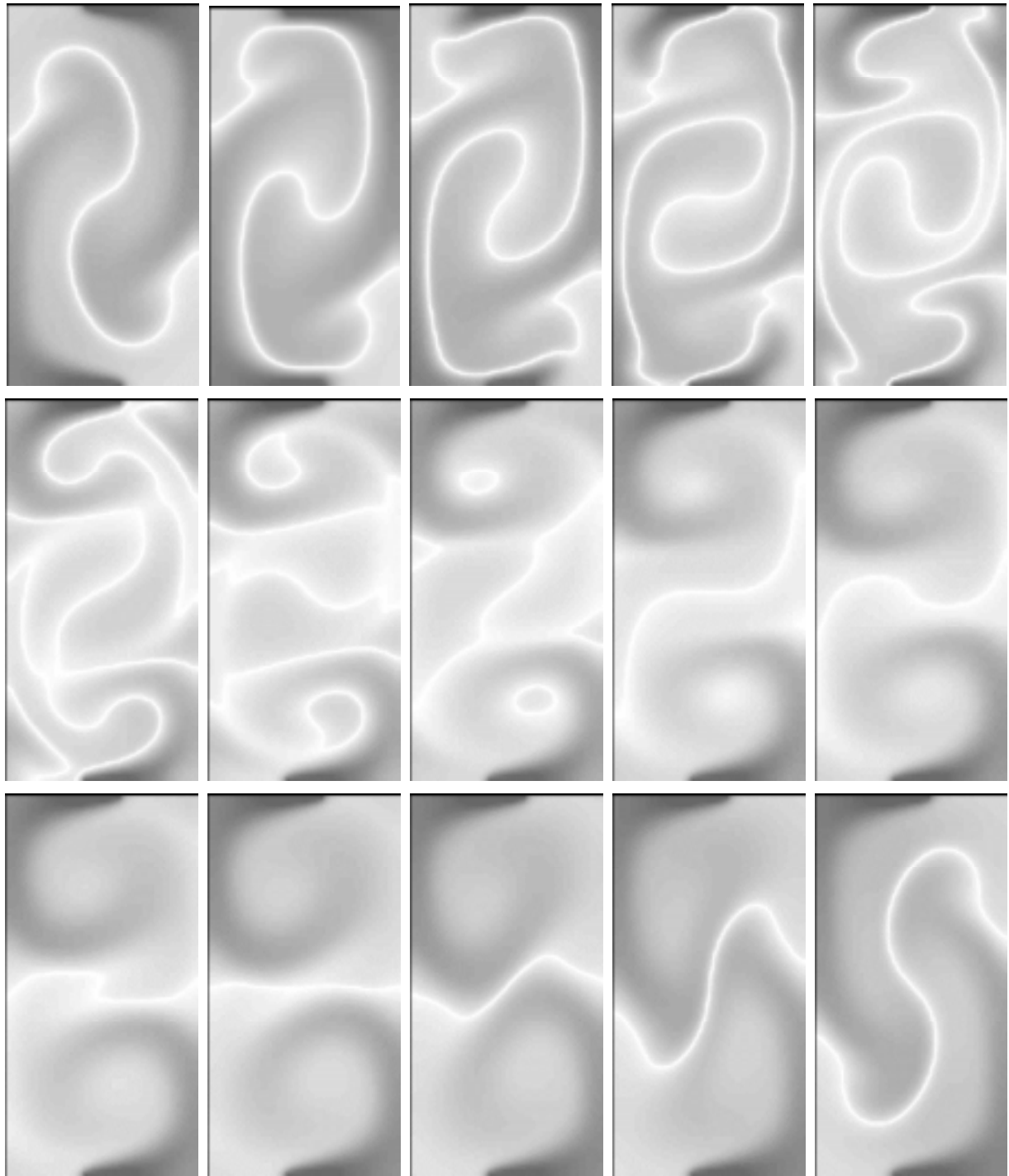


Рис. 7. Изменения поля температуры в течение полуцикла колебаний в режиме V3;
течение воздуха при $Gr_H = 1 \cdot 10^7$.