Сергей Петрович БАУТИН[1]
Александр Геннадьевич ОБУХОВ[2]

УДК 533.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЯХ*

[1] доктор физико-математических наук,
профессор кафедры высшей и прикладной математики,
Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ
sbautin@usurt.ru

[2] доктор физико-математических наук,
профессор кафедры бизнес-информатики и математики,
Тюменский индустриальный университет
agobukhov@inbox.ru

Аннотация

Представлены результаты численного моделирования свободных огненных вихрей, возникающих в лабораторных условиях. Возможность получения такого рода концентрированных огненных вихрей была продемонстрирована в серии экспериментальных работ, проведенных под руководством члена-корреспондента РАН А. Ю. Вараксина в Объединенном институте высоких температур РАН.

Аналитические и численные исследования возникающих сложных закрученных течений газа при локальном нагреве металлической подстилающей поверхности несколькими источниками предлагается рассматривать с точки зрения газовой динамики. При рассмотрении сложных течений нагревающегося газа как движения вязкой, теплопроводной

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 1.4539.2017/8.9).

Цитирование: Баутин С. П. Численное моделирование сложных течений газа в концентрированных огненных вихрях / С. П. Баутин, А. Г. Обухов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 3. С. 47-68.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-47-68

и сжимаемой сплошной среды использована полная система уравнений Навье — Стокса. Предложенные начально-краевые условия позволили численно определить основные газодинамические характеристики возникающих трехмерных и нестационарных течений газа в свободных огненных вихрях.

Результаты расчетов показали, что при формировании огненных вихрей выделяется несколько этапов в их развитии. Первый этап характеризуется возникновением локальных течений газа, расходящихся в радиальном направлении от областей нагрева. Второй этап сопровождается формированием в областях расположения источников нагрева локальных вихрей с противоположными направлениями закрутки. Третий этап характерен тем, что из более мелких вихрей за счет интенсивного притока внешнего воздуха образуется общий крупный тепловой вихрь, который получает положительную закрутку под действием силы Кориолиса. На четвертом этапе с возрастанием скорости вращения наблюдается уменьшение вертикальных размеров теплового вихря и его распад на несколько мелких. Таким образом, завершение жизненного цикла одного концентрированного вихря сменяется формированием нового. Для исходных параметров время жизни концентрированного теплового вихря составляет порядка одной минуты.

Ключевые слова

Трехмерные нестационарные течения газа, огненные вихри, полная система уравнений Навье — Стокса, начально-краевые задачи, численные решения.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-47-68

Введение

Вихревое движение является распространенной формой движения сплошных сред. К природным вихревым течениям относятся так называемые пыльные «дьяволы», водяные, воздушные и огненные смерчи [22, 23]. Вихри применяются в промышленных устройствах [27]. Физическое моделирование такого рода концентрированных вихрей в условиях лаборатории является весьма актуальной задачей. До настоящего времени фактически отсутствуют экспериментальные работы, в которых были бы получены свободные тепловые вихри, кроме работ [10-16, 18-21, 30-33].

В работе [17] демонстрируется возможность физически смоделировать свободные огненные вихри в условиях лаборатории, не используя какие-либо закручивающие устройства. Для этого использовалась простая установка, схема которой приведена на рис. 1.

В рамках эксперимента поджигались таблетки уротропина. «Масса каждой таблетки 21 г (диаметр 40 мм). Теплота сгорания уротропина 30 МДж/кг. Девятнадцать таблеток располагались в центре подстилающей поверхности, формируя вписанный в окружность (диаметр 300 мм) шестиугольник» [17, с. 160], как показано на рис. 2.

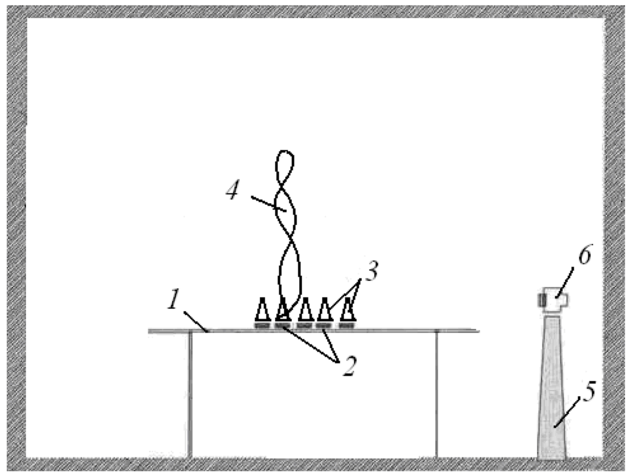

Рис. 1. Установка генерирования огненных свободных вихрей:
1 — металлическая поверхность;
2 — таблетки уротропина;
3 — пламя;
4 — огненный вихрь;
5 — стойка;
6 — цифровой фотоаппарат

Источник: [17].

Fig. 1. Installation diagram for the generation of free fire vortexes:
1 — metal surface;
2 — urotropic tablets;
3 — fire;
4 — fire vortex;
5 — stand;
6 — digital camera

Source: [17].

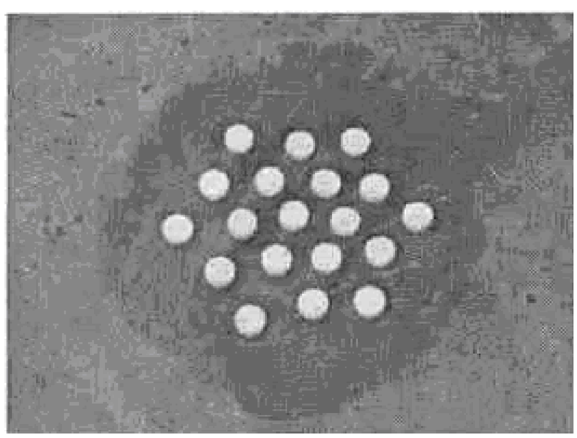

Рис. 2. Таблетки горючего на подстилающей поверхности

Источник: [17].

Fig. 2. Tablets of fuel on the underlying surface

Source: [17].

Во время опыта подожженные на металлической поверхности (1) таблетки уротропина (2) образовывали пламя (3) и также могли сгенерировать огненные вихри (4), «высота которых значительно превосходила высоту пламени над областью расположения горючего» [17, с. 160], что отображено на рис. 3. «Признаком возникновения огненных вихревых структур также служило появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания» [17, с. 160]. Весь процесс горения и генерации огненных вихрей записывался с помощью расположенного на стойке (5) цифрового фотоаппарата (6) (рис. 1).

а б

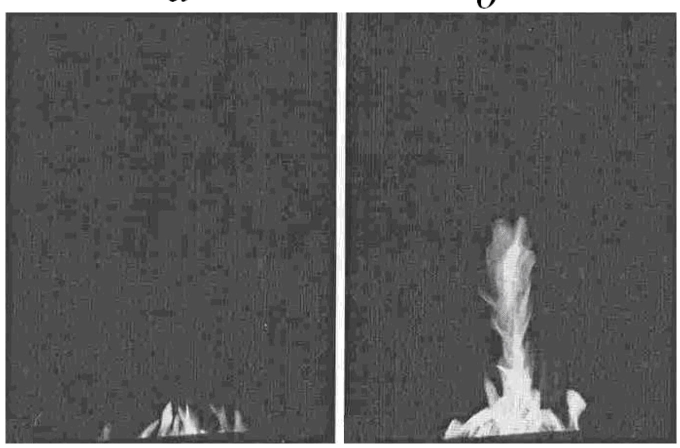

Рис. 3. Изображение горения таблеток:
а) обычное горение таблеток;
б) зафиксированный огненный вихрь

Источник: [17].

Fig. 3. Tablet burning:
a) normal burning;
б) a fixed fire vortex

Source: [17].

В результате многократного повторения эксперимента было выявлено, что «самые первые вихревые огненные структуры начинали образовываться через 3 мин, а самые последние — через 12 мин после поджига таблеток. Полное сгорание таблеток происходило за 15-17 мин. Образование огненных вихрей происходило как в центре области расположения горючего, так и на ее периферии» [17, с. 160-161]. За один эксперимент можно было наблюдать до 15 вихревых структур со следующими параметрами: время жизни — от 1 до 5 с; наибольшая высота — 0,7 м; максимальный диаметр — 0,05 м [17, с. 161].

«Процесс формирования огненного вихря… сопровождается заметным радиальным притоком воздуха со всех направлений к основанию основного (центрального) конвективного потока и сопутствующим закручиванием потока относительно вертикальной оси вследствие наличия градиентов скоростей и температур. Поток продуктов сгорания в огненном вихре состоит из комбинации относительно тонких вихревых нитей, вращающихся и взаимодействующих друг с другом» [17, с. 161].

Физически смоделированные в результате описанного эксперимента «огненные вихри являются лабораторными аналогами огненных смерчей, возникающих при крупных лесных пожарах, возгораниях на больших площадях в городских районах при плотной застройке, на лесоперерабатывающих предприятиях» [17, с. 161], на участках сельскохозяйственных угодий.

Численное моделирование генерирования огненных свободных лабораторных вихрей без использования специальных устройств для закрутки и явилось одной из задач данной работы. Приведенные далее результаты аналитических и численных исследований продолжают и развивают сформированное направление в области численного моделирования нестационарных трехмерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в тепловых закрученных потоках и огненных вихрях [2, 9, 25, 28].

Математическая модель. Начальные и граничные условия

Чтобы описать сложные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа с диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, в работе используется полная система уравнений Навье — Стокса, которая в безразмерных переменных с учетом действия сил тяжести и Кориолиса в векторной форме имеет следующий вид [3, 6-8]:

$$\begin{cases} \rho_t + \boldsymbol{V}\cdot\nabla\rho + \rho\,\mathrm{div}\boldsymbol{V} = 0, \\ \boldsymbol{V}_t + (\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\boldsymbol{V} + \dfrac{T}{\gamma\rho}\nabla\rho + \dfrac{1}{\gamma}\nabla T = \boldsymbol{g} - 2\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{V} + \dfrac{\mu_0}{\rho}\left[\dfrac{1}{4}\nabla(\mathrm{div}\boldsymbol{V}) + \dfrac{3}{4}\Delta\boldsymbol{V}\right], \\ T_t + \boldsymbol{V}\cdot\nabla T + (\gamma-1)T\,\mathrm{div}\boldsymbol{V} = \dfrac{\kappa_0}{\rho}\Delta T + \dfrac{\mu_0\gamma(\gamma-1)}{2\rho}\Big\{\Big[\big(u_x - v_y\big)^2 + \\ +(u_x - w_z)^2 + \big(v_y - w_z\big)^2\Big] + \dfrac{3}{2}\Big[\big(u_y + v_x\big)^2 + (u_z + w_x)^2 + \big(v_z + w_y\big)^2\Big]\Big\}, \end{cases} \tag{1}$$

где безразмерные коэффициенты вязкости и теплопроводности имеют следующие значения: $\mu_0 = 0{,}001$, $\kappa_0 \approx 1{,}46\mu_0$.

В системе (1): t — время; x, y, z — декартовы координаты; ρ — плотность газа; $\boldsymbol{V} = (u, v, w)$ — вектор скорости газа с проекциями на соответствующие декартовы оси; T — температура газа; $\boldsymbol{g} = (0, 0, -g)$ — вектор ускорения силы тяжести, а $g = \mathrm{const} > 0$; $-2\Omega\times\boldsymbol{V} = (av - bw, -au, bu)$ — вектор ускорения силы Кориолиса, где $a = 2\Omega\sin\psi$, $b = 2\Omega\cos\psi$, $\Omega = |\Omega|$; Ω — вектор угловой скорости вращения Земли; ψ — широта точки O — начала декартовой системы координат $Oxyz$, вращающейся вместе с Землей [3, 6-8].

В качестве начальных условий при описании соответствующих течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности взяты функции, задающие точное решение [5] системы (1):

$$u = 0, v = 0, w = 0, T_0(z) = 1 - kz,$$

$$k = \frac{lx_{00}}{T_{00}}, l = 0{,}0065\ \frac{К}{м}, x_{00} = 1\ м, T_{00} = 288\ ^{\circ}К, \tag{2}$$

$$\rho_0(z) = (1 - kz)^{\nu-1}, \nu = \frac{\gamma g}{k} = \mathrm{const} > 0. \tag{3}$$

Расчетная область представляет собой куб с единичными длинами сторон $x_0 = y_0 = z_0 = 1$, изображенный на рис. 4.

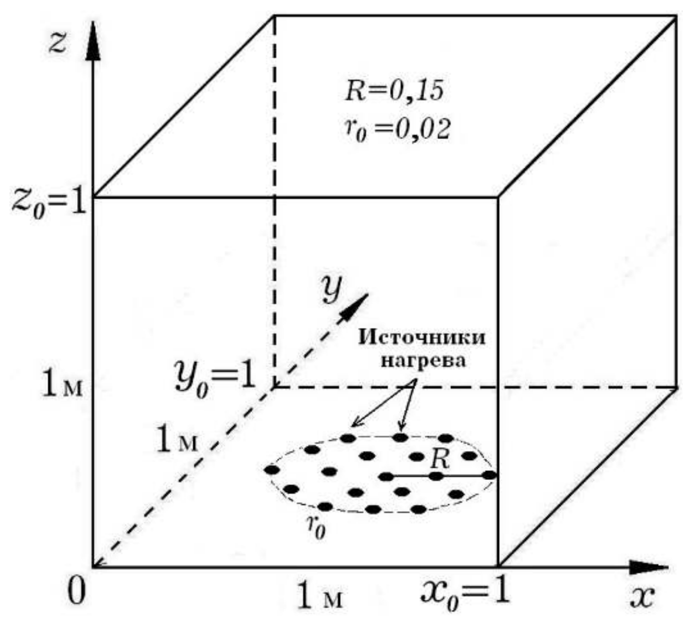

Рис. 4. Кубическая расчетная область

Fig. 4. Calculated area in the form of a cube

Граничные условия и способы вычисления газодинамических характеристик на гранях расчетной области представлены следующим образом [4]. Значения плотности на боковых гранях куба $x = 0$, $x = x_0$, $y = 0$, $y = y_0$ и на верхней грани $z = z_0$ вычисляются из условия непрерывности, т. е. значения плотности на боковых гранях рассчитываются линейной интерполяцией из внутренних узлов расчетной области. На нижней грани $z = 0$ для плотности ставится условие симметрии. Это значит, что значения плотности на нижней грани рассчитываются из условия равенства нулю их производных по нормали к грани. На боковых гранях и верхней грани расчетной области на значения всех составляющих векторов скорости накладываются условия непрерывности, т. е. значения всех составляющих скоростей на границе рассчитываются линейной интерполяцией из внутренних узлов расчетной области. На нижней грани для компонент скорости заданы условия непротекания. При этом третья компонента скорости равна нулю $w|_{z=0} = 0$, а первая и вторая компоненты вектора скорости определяются из условия симметрии, т. е. считаются из условия равенства нулю их производных по нормали к грани. Для температуры на боковых гранях и верхней грани значения рассчитываются из условия непрерывности [1, 4].

Постепенный нагрев 19 областей нижней грани до температуры 300 °C смоделирован такой функцией времени и координат [1, 24, 26, 29]:

$$T(x,y,t) = 1 + T^*(1 - e^{-10t}) \sum_{l=1}^{19} e^{-\frac{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2}{r_0^2}}, \tag{4}$$

где $T^* = 0{,}99$ — коэффициент, определяющий добавку к значению температуры, принятому за единичное масштабное значение; $r_0 = 0{,}02$ — безразмерное значение радиусов нагрева; x_l, y_l, $l = 1 \div 19$ — координаты центров источников нагрева, расположенных в центре нижней грани расчетной области внутри круга с радиусом $R = 0{,}15$. Таким образом, поставленные граничные условия моделируют появление нестационарных трехмерных течений сжимаемого газа (со свойствами вязкости и теплопроводности), инициируемых нагревом 19 источников тепла. Граничные условия предполагают возможность свободного перемещения газа через все грани расчетной области, кроме нижней грани. Масштабные размерные значения плотности, скорости, расстояния и времени в расчетах принимались такими: $\rho_{00} = 1{,}29$ кг/м^3, $u_{00} = 333$ м/с, $x_{00} = 1$ м, $t_{00} = \frac{x_{00}}{u_{00}} = 0{,}003$ с. Разностные шаги дискретизации по трем координатам $\Delta x = \Delta y = 0{,}005$, $\Delta z = 0{,}05$, а шаг дискретизации по времени $\Delta t = 0{,}001$ [1, 24, 26, 29].

Результаты расчетов

На рис. 5-16 представлены характерные результаты проведенных расчетов термодинамических характеристик потока нагретого воздуха при нагревании нижней плоскости. На рисунках представлены характеристики, рассчитанные для высоты 0,1 м и для моментов времени 10, 20, 30, 40 секунд. На осях координат *Ox* и *Oy* отмечены номера узлов вычислительной сетки.

На рис. 5-8 приведены графики рассчитанных распределений температуры в указанные выше моменты времени. На представленных рисунках видно, что в начальные моменты нагрева температура газа имеет локальные повышенные значения в областях расположения источников нагрева. В дальнейшем эти области размываются в горизонтальных направлениях и объединяются друг с другом.

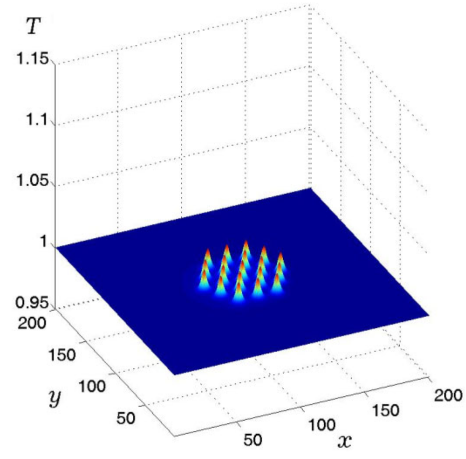

Рис. 5. Температура при $t_1 = 10$ с

Fig. 5. Temperature at $t_1 = 10$ s

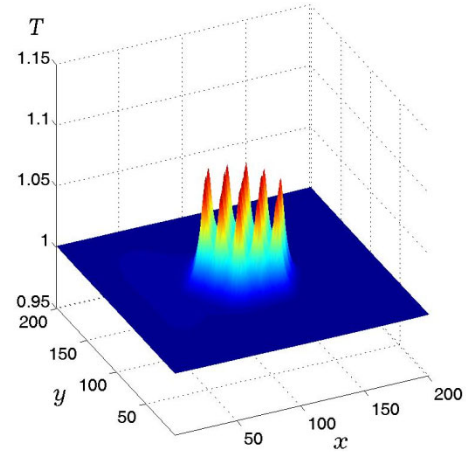

Рис. 6. Температура при $t_2 = 20$ с

Fig. 6. Temperature at $t_2 = 20$ s

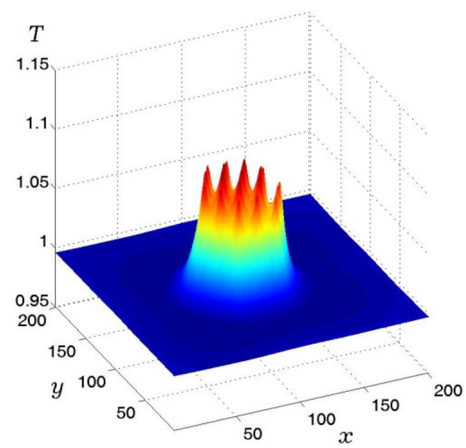

Рис. 7. Температура при $t_3 = 30$ с

Fig. 7. Temperature at $t_3 = 30$ s

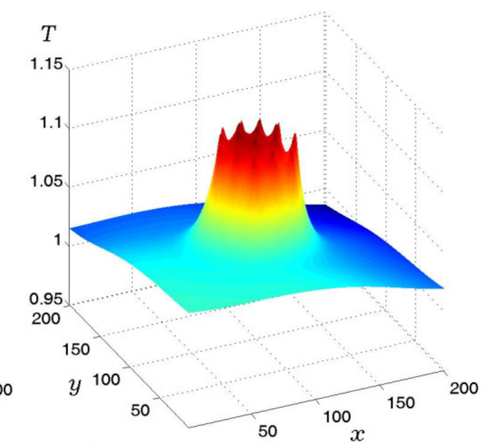

Рис. 8. Температура при $t_4 = 40$ с

Fig. 8. Temperature at $t_4 = 40$ s

Периферийные значения температуры в начале нагрева соответствуют единичному масштабному значению 288 °K (рис. 5, 6). С течением времени наблюдается их уменьшение (рис. 7), а затем — неравномерное возрастание (рис. 8).

На рис. 9-12 изображены графические распределения вычисленных плотностей газа соответствующих моментов времени. Из расчетов следует, что

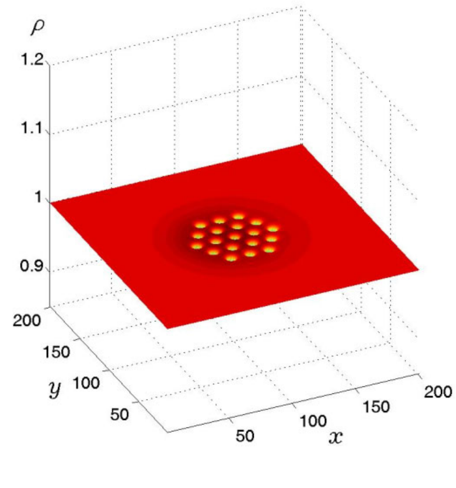

Рис. 9. Плотность при t_1 = 10 с

Fig. 9. Density at t_1 = 10 s

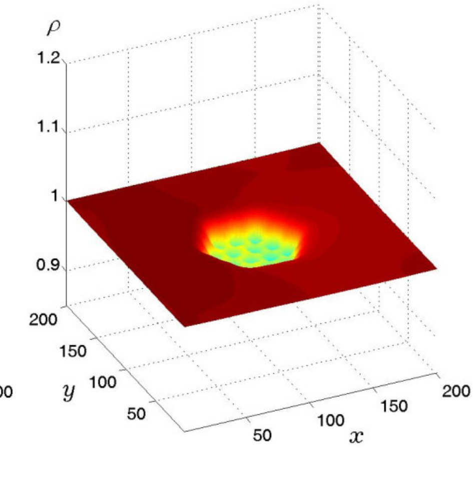

Рис. 10. Плотность при t_2 = 20 с

Fig. 10. Density at t_2 = 20 s

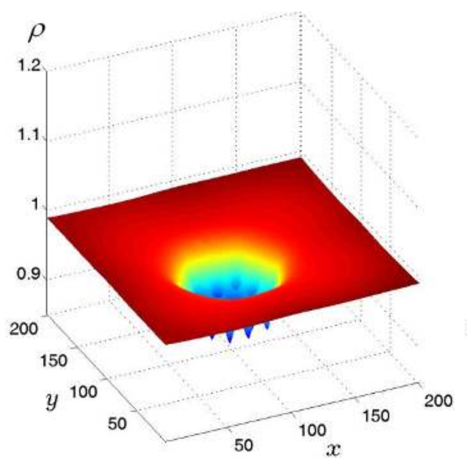

Рис. 11. Плотность при t_3 = 30 с

Fig. 11. Density at t_3 = 30 s

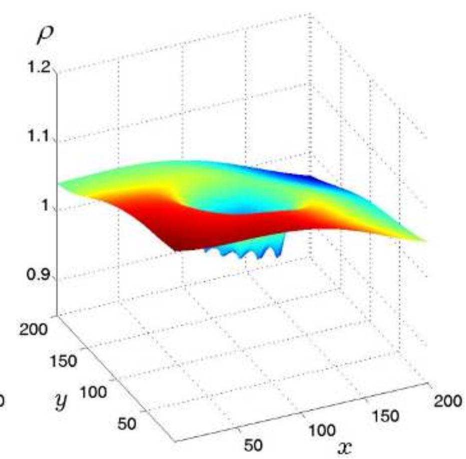

Рис. 12. Плотность при t_4 = 40 с

Fig. 12. Density at t_4 = 40 s

в начале нагрева плотность газа имеет вид воронок с пониженными значениями, расположенных локально в областях нагрева (рис. 9). Локально расположенные области пониженной плотности достаточно быстро объединяются в одну (рис. 10), и с течением времени эта область расширяется вдоль радиусов к периферийным участкам (рис. 11). Расчеты говорят о том, что периферийные значения плотности, аналогично температуре, в начале нагрева подвержены неравномерным изменениям. Например, значения плотности газа в момент времени $t_4 = 40$ с вблизи начала прямоугольной системы координат выше, чем в противоположной части расчетной области (рис. 12). Однако это соотношение между значениями плотности изменяется как от времени, так и от координат.

На рис. 13-16 отражены графические распределения вычисленных значений давления газа в соответствующих моментах времени. Проведенные расчеты говорят о том, что в начале процесса нагрева давление газа имеет локальные максимумы, расположенные в областях нагрева (рис. 13). Со временем вокруг каждой локальной области повышенного давления формируются расширяющиеся области пониженного давления, которые имеют форму кольца. При этом давление газа на периферии соответствует первоначальному значению стационарного распределения. При нагреве значения давления в периферических областях начинают изменяться, формируя область пониженного давления в центре расчетной области (рис. 14). Затем по аналогии с изменениями температуры и плотности наблюдается неравномерное изменение давления в горизонтальной плоскости (рис. 16).

Выполненные в работе расчеты температуры, плотности и давления исследуемых течений газа показали адекватность предложенной математической модели, которая позволяет выполнять численные эксперименты для описания возникающих сложных нестационарных трехмерных течений. Установленные при расчетах локальные перепады температуры, плотности и давления приводят к соответствующим изменениям течения газа в горизонтальных и в вертикальных плоскостях. Следует отметить, что наблюдаемая в расчетах мелкая структура в изменениях температуры, плотности и давления более отчетливо проявляется вблизи нижней грани расчетной области.

Далее проводится анализ результатов расчета скоростей течений воздуха в закрученном восходящем потоке при нагревании нижней поверхности 19 источниками тепла. На рис. 17-20 представлены графические распределения вычисленных значений первой компоненты скорости газа при нагревании 19 источниками нижней грани для высоты 0,1 м в соответствующих моментах времени. На осях координат *Ox* и *Oy* отмечены номера узлов вычислительной сетки.

Первая компонента скорости газа позволяет выделить следующие фазы развития тепловых вихрей. Для первой фазы характерно появление вблизи каждого из 19 источников тепла множественных мелких вихревых образований с противоположным направлением закрутки (рис. 17). Желтый и красный цвет на рисунке соответствует положительной скорости течения газа (вдоль оси *Ox*), а синий цвет — отрицательной скорости течения газа (против направления оси *Ox*). Вторая фаза характеризуется наложением на мелкую вихревую структуру более крупного течения газа, расходящегося от области нагрева (рис. 18, в том числе стрелки). Наступление третьей фазы характеризуется возникновением двух вихрей с противоположными направлениями вращения (рис. 19, в том числе стрелки): ближнее к наблюдателю имеет положительное направление закрутки, а дальнее

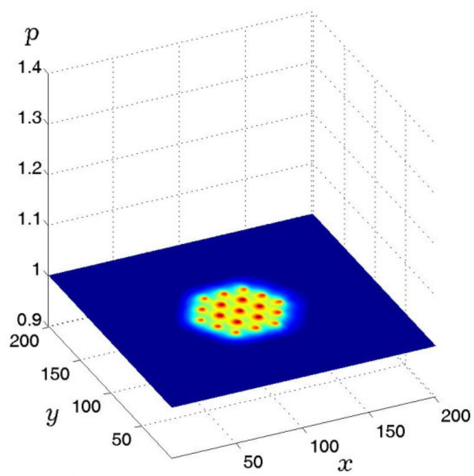

Рис. 13. Давление при t_1 = 10 с

Fig. 13. Pressure at t_1 = 10 s

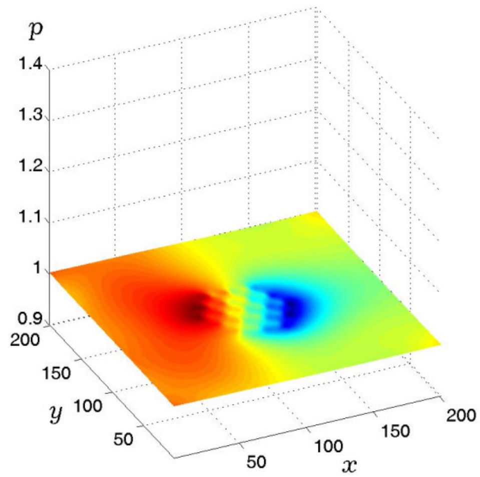

Рис. 14. Давление при t_2 = 20 с

Fig. 14. Pressure at t_2 = 20 s

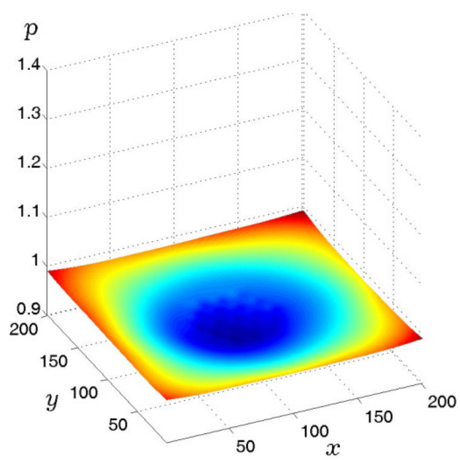

Рис. 15. Давление при t_3 = 30 с

Fig. 15. Pressure at t_3 = 30 s

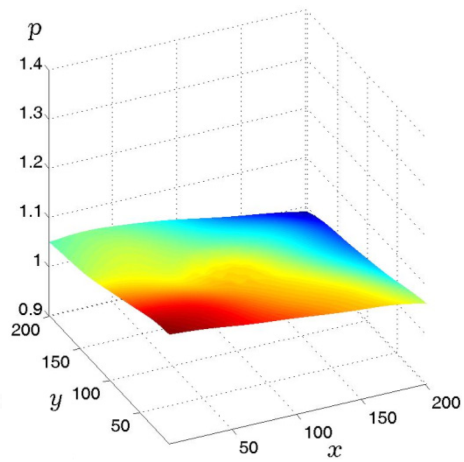

Рис. 16. Давление при t_4 = 40 с

Fig. 16. Pressure at t_4 = 40 s

от наблюдателя — отрицательное. И, наконец, расчеты показывают наличие еще одной стадии в развитии огненного вихря. На этой стадии за счет интенсивного притока внешнего воздуха и действия на него силы Кориолиса происходит постепенное преобладание положительного направления закрутки всего потока (рис. 20, в том числе стрелки), в результате чего образуется огненный вихрь, наблюдаемый в экспериментах (рис. 3б). Отмеченные этапы формирования концентрированного теплового вихря не следуют последовательно строго друг за другом. Однако характерные их особенности позволяют расположить каждый из этапов в некоторой хронологической последовательности.

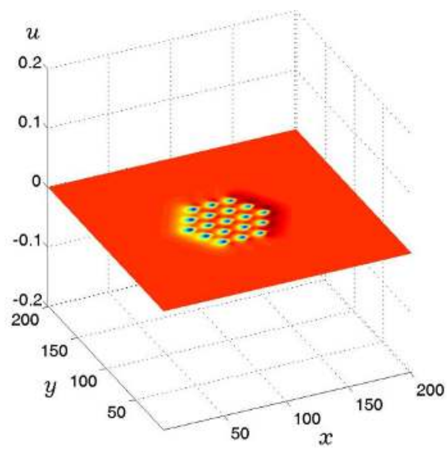

Рис. 17. Скорость *u* при t_1 = 10 с

Fig. 17. Speed *u* at t_1 = 10 s

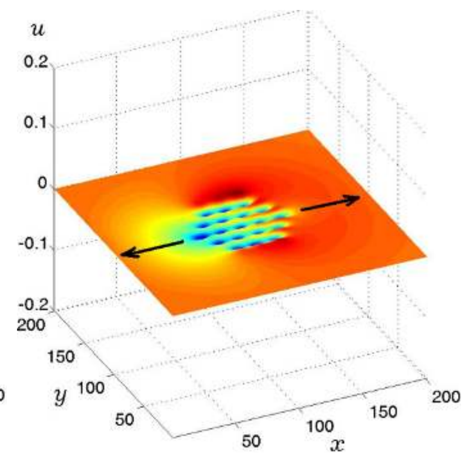

Рис. 18. Скорость *u* при t_2 = 20 с

Fig. 18. Speed *u* at t_2 = 20 s

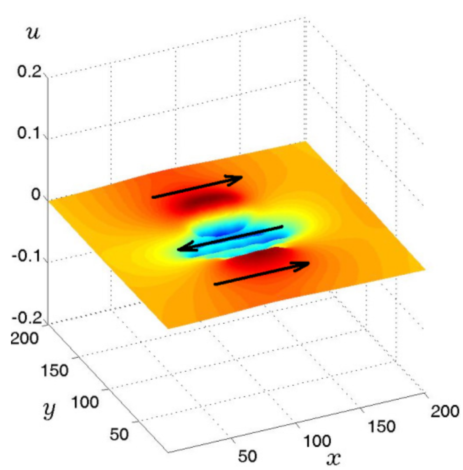

Рис. 19. Скорость *u* при t_3 = 30 с

Fig. 19. Speed *u* at t_3 = 30 s

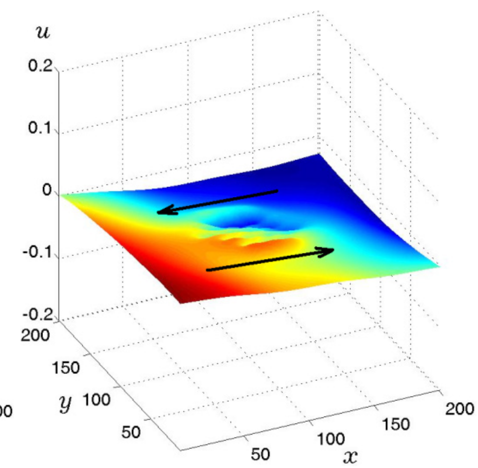

Рис. 20. Скорость *u* при t_4 = 40 с

Fig. 20. Speed *u* at t_4 = 40 s

На рис. 21-24 показаны графики вычисленных значений второй компоненты скорости течения газа в соответствующих моментах времени.

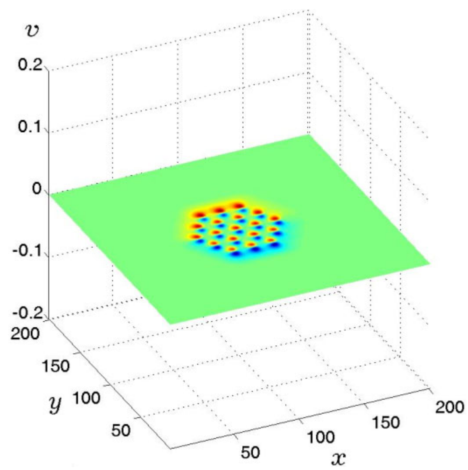

Рис. 21. Скорость v при $t_1 = 10$ с

Fig. 21. Speed v at $t_1 = 10$ s

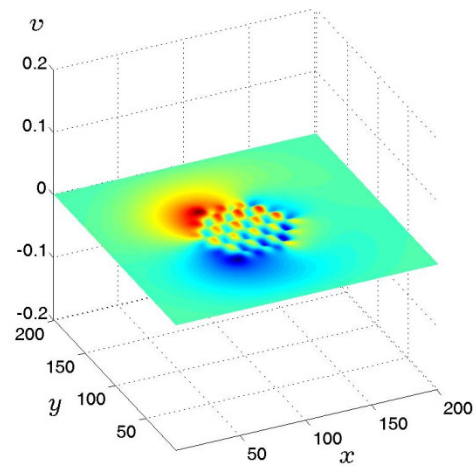

Рис. 22. Скорость v при $t_2 = 20$ с

Fig. 22. Speed v at $t_2 = 20$ s

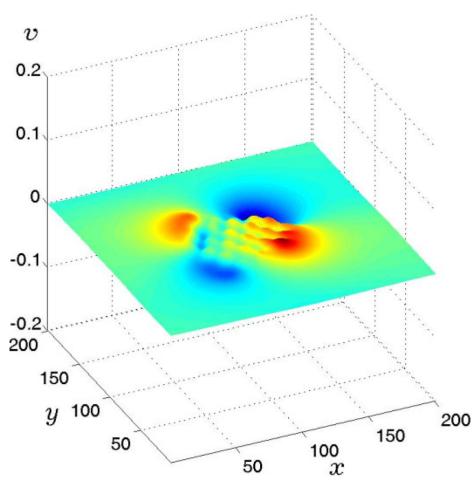

Рис. 23. Скорость v при $t_3 = 30$ с

Fig. 23. Speed v at $t_3 = 30$ s

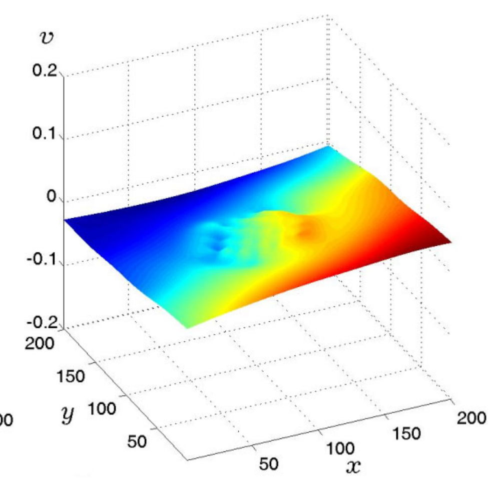

Рис. 24. Скорость v при $t_4 = 40$ с

Fig. 24. Speed v at $t_4 = 40$ s

На рис. 25-26 приводятся графические распределения вычисленной третей компоненты скорости в соответствующие моменты времени $t_1 = 10$ с и $t_4 = 40$ с на высоте 0,1 м от подстилающей поверхности.

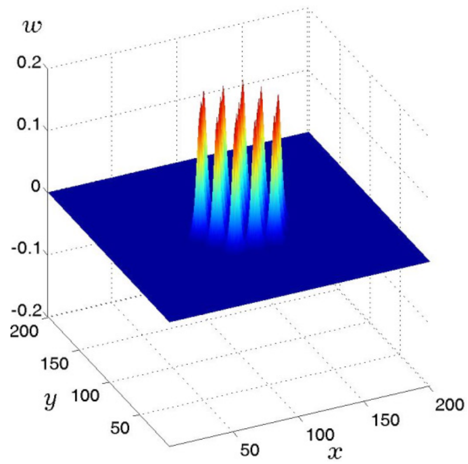

Рис. 25. Скорость w при $t_1 = 10$ с

Fig. 25. Speed w at $t_1 = 10$ s

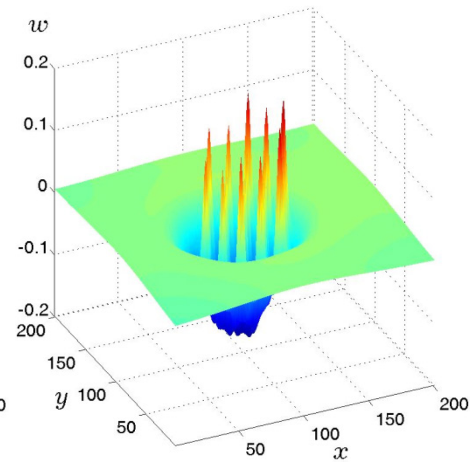

Рис. 26. Скорость w при $t_4 = 40$ с

Fig. 26. Speed w at $t_4 = 40$ s

Из рис. 25 вытекает, что в данный фиксированный момент времени $t_1 = 10$ с возникают вертикальные потоки воздуха над 19 источниками нагрева. Максимальные значения вертикальных компонент скоростей точно соответствуют точкам расположения источников нагрева, а при удалении к периферийным участкам уменьшаются до нуля. Для момента времени $t_4 = 40$ с максимальные значения третьей компоненты скорости течения газа принимают значения 0,1 (33 м/с). Вокруг области локальных максимумов вертикальная компонента скорости приобретает отрицательные значения, которые означают движение газа вертикально вниз.

Результаты вычисления трех компонент вектора скорости течения газа говорят о сложном характере возникающего движения воздуха при нагреве нижней поверхности 19 источниками.

Сложное течение в огненных концентрированных вихрях проиллюстрировано на рис. 27-30, показывающих построенные линии тока в некоторые расчетные моменты.

Представленные на рисунках линии тока демонстрируют нестационарный и сложный характер потоков воздуха, появляющихся при локальном нагреве несколькими источниками. Одной из основных особенностей появляющихся течений является их закрутка в противоположных направлениях, что свидетельствует о перемешивании потоков воздуха как в горизонтальных, так и в вертикальных плоскостях. Кроме того, на представленных рисунках хорошо видно формирование сгущения линий тока в центральной части расчетной области над источниками нагрева. Это можно трактовать как возникновение концентрированного огненного вихря над 19 источниками тепла в виде горящих таблеток.

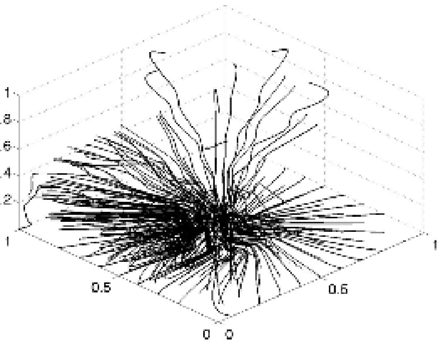

Рис. 27. Линии тока газа для t_1 = 10 с

Fig. 27. Stream lines at t_1 = 10 s

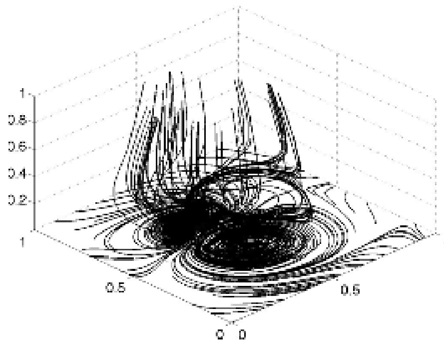

Рис. 28. Линии тока газа для t_2 = 20 с

Fig. 28. Stream lines at t_2 = 20 s

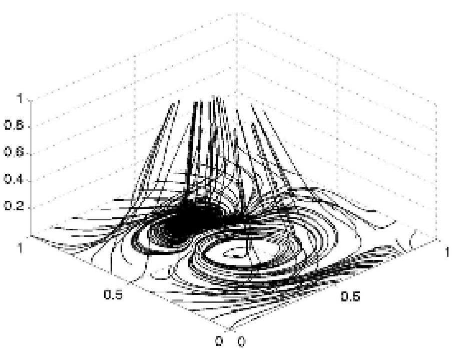

Рис. 29. Линии тока газа для t_3 = 30 с

Fig. 29. Stream lines at t_3 = 30 s

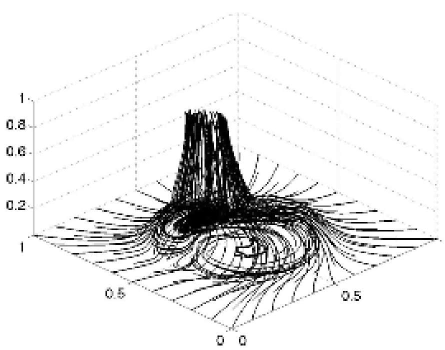

Рис. 30. Линии тока газа для t_4 = 40 с

Fig. 30. Stream lines at t_4 = 40 s

Заключение

Выполненные расчеты фиксируют сложную структуру исследуемых течений, которые имеют четко выраженный нестационарный характер. В работе приведены результаты расчетов всех газодинамических параметров течений как функций времени, а также построены мгновенные линии тока частиц газа.

Результаты проведенных расчетов показали, что при формировании огненных вихрей можно выделить несколько характерных этапов, последовательная смена которых приводит к появлению из мелких вихревых образований общего крупного теплового вихря, приобретающего под действием силы Кориолиса закрутку положительного направления. При росте значений скорости вращения наблюдается резкое сокращение вертикального размера и, в конце концов, распад общего концентрированного теплового вихря на несколько мелких. Жизненный цикл одного огненного концентрированного вихря завершается выбросом газа из расчетной области, после которого постепенно начинается процесс формирования нового огненного вихря. При заданных начальных параметрах время жизни одного теплового закрученного потока воздуха равен одной минуте.

Установленная в результате проведенных расчетов нестационарная структура течения вызвана одновременным действием на физический процесс сжимаемости, вязкости и теплопроводности движущейся среды, а также действием сил тяжести и Кориолиса. Все эти факторы обуславливают градиенты давления в локальных частях потока. Рассчитанные картины тепловых газодинамических потоков во многих элементах совпадают с наблюдаемыми в экспериментах характерными особенностями течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранникова Д. Д. Математическое численное моделирование температурных закрученных потоков воздуха в условиях действия сил тяжести и Кориолиса: дисс. … канд. физ.-мат. наук / Д. Д. Баранникова. Тюмень, 2017.
2. Баутин С. П. Математическое и экспериментальное моделирование восходящих закрученных потоков / С. П. Баутин, Л. В. Абдубакова, Д. Д. Баранникова, А. О. Казачинский, И. Ю. Крутова, А. В. Мезенцев, А. Г. Обухов, Е. М. Сорокина // Сборник трудов XI Всероссийской конференции по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 2015. С. 378-380.
3. Баутин С. П. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей / С. П. Баутин, А. Г. Обухов. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
4. Баутин С. П. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа / С. П. Баутин, А. Г. Обухов // Известия вузов. Нефть и газ. 2013. № 5. С. 55-63.
5. Баутин С. П. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики / С. П. Баутин, А. Г. Обухов // Известия вузов. Нефть и газ. 2013. № 4. С. 81-86.
6. Баутин С. П. Представление решений системы уравнений Навье — Стокса в окрестности контактной характеристики / С. П. Баутин // Прикладная математика и механика. 1987. Том 51. Вып. 4. С. 574-584.
7. Баутин С. П. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси / С. П. Баутин, С. Л. Дерябин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. Екатеринбург: УрГУПС, 2017. 336 с.
8. Баутин С. П. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов, К. В. Баутин. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. 215 с.

9. Баутин С. П. Численное моделирование огненных вихрей при учете сил тяжести и Кориолиса / С. П. Баутин, А. Г. Обухов, Д. Д. Баранникова // Теплофизика высоких температур. 2018. Том 56. № 2. С. 241-246. DOI: 10.7868/S0040364418020114
10. Вараксин А. Ю. Генерация свободных концентрированных воздушных вихрей в лабораторных условиях / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, С. И. Таекин, В. Н. Копейцев // Теплофизика высоких температур. 2009. Том 47. № 1. С. 84-88.
11. Вараксин А. Ю. К вопросу управления поведением воздушных смерчей / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев // Теплофизика высоких температур. 2009. Том 47. № 6. С. 870-876.
12. Вараксин А. Ю. К выбору параметров частиц для визуализации и диагностики свободных концентрированных воздушных вихрей / А. Ю. Вараксин, М. В. Протасов, Ю. С. Теплицкий // Теплофизика высоких температур. 2014. Том 52. № 4. С. 581-587. DOI: 10.7868/S0040364414040267
13. Вараксин А. Ю. Метод воздействия на свободные нестационарные воздушные вихри / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, М. А. Горбачев // Теплофизика высоких температур. 2012. Том 50. № 4. С. 533-537.
14. Вараксин А. Ю. Моделирование свободных тепловых вихрей: генерация, устойчивость, управление / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, М. А. Горбачев // Теплофизика высоких температур. 2010. Том 48. № 6. С. 965-972.
15. Вараксин А. Ю. О возможности визуализации при моделировании воздушных смерчей / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев // Теплофизика высоких температур. 2010. Том 48. № 4. С. 617-622.
16. Вараксин А. Ю. О возможности воздействия на вихревые атмосферные образования / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев // Теплофизика высоких температур. 2010. Том 48. № 3. С. 433-437.
17. Вараксин А. Ю. О возможности генерации концентрированных огненных вихрей без использования принудительной закрутки / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев // Доклады Академии наук. 2014. Том 456. № 2. С. 159-161. DOI: 10.7868/S0869565214140102
18. Вараксин А. Ю. О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, С. И. Таекин // Теплофизика высоких температур. 2008. Том 46. № 6. С. 957- 960.
19. Вараксин А. Ю. Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, С. И. Таекин // Теплофизика высоких температур. 2010. Том 48. № 2. С. 269-273.
20. Вараксин А. Ю. Торнадо / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев. М.: Физматлит, 2011. 312 с.
21. Вараксин А. Ю. Физическое моделирование воздушных смерчей: некоторые безразмерные параметры / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, М. А. Горбачев // Теплофизика высоких температур. 2011. Том 49. № 2. С. 317-320.
22. Наливкин Д. В. Смерчи / Д. В. Наливкин. М.: Наука, 1984. 112 с.
23. Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность / Д. В. Наливкин. Л.: Наука, 1969. 487 с.
24. Обухов А. Г. Математическое моделирование и численный расчет начальной стадии формирования теплового восходящего закрученного потока / А. Г. Обухов,

Д. Д. Баранникова // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. 2014. № 11. С. 113-118.

25. Обухов А. Г. Особенности течения газа в начальной стадии формирования теплового восходящего закрученного потока / А. Г. Обухов, Д. Д. Баранникова // Известия вузов. Нефть и газ. 2014. № 6. С. 65-70.
26. Обухов А. Г. Расчеты термодинамических характеристик течений газа при моделировании концентрированных огненных вихрей / А. Г. Обухов // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019). Москва, 2019. С. 525-527.
27. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Полнее, М. Н. Сергеев. М.: Энергомаш, 2000. 412 с.
28. Сорокина Е. М. Численный расчет скоростей конвективного течения газа при кольцеобразной схеме нагрева / Е. М. Сорокина, А. Г. Обухов // Известия вузов. Нефть и газ. 2015. № 3. С. 84-90.
29. Obukhov A. G. Numerical calculation of thermodinamic parameters unsteady three-dimensional rising swirling flow air / A. G. Obukhov, S. P. Bautin, L. V. Abdubakova // Physical and Mathematical Sciences. 2015. № 2. Pp. 16-24.
30. Varaksin A. Yu. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices / A. Yu. Varaksin, M. E. Romash, V. N. Kopeitsev // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. Pp. 817-828. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008
31. Varaksin A. Yu. Method of impact on free nonstationary air vortices / A. Yu. Varaksin, M. E. Romash, V. N. Kopeitsev, M. A. Gorbachev // High Temperature. 2012. Vol. 50. № 4. Pp. 496-500. DOI: 10.1134/S0018151X12040219
32. Varaksin A. Yu. The generation of free air vortexes under laboratory condition / A. Yu. Varaksin, M. E. Romash, S. I. Taekin, V. N. Kopeitsev // High Temperature. 2009. Vol. 47. № 1. Pp. 78-82. DOI: 10.1134/S0018151X09010106
33. Varaksin A. Yu. The possibility of physical simulation of air tornado under laboratory condition / A. Yu. Varaksin, M. E. Romash, V. N. Kopeitsev, S. I. Taekin // High Temperature. 2008. Vol. 46. № 6. Pp. 888-891. DOI: 10.1134/S0018151X08060229

Sergei P. BAUTIN[1]
Alexandr G. OBUKHOV[2]

UDC 533.6

NUMERICAL SIMULATION OF COMPLEX GAS FLOWS IN CONCENTRATED FIRE VORTICES*

[1] Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor,
Department of Higher and Applied Mathematics,
Snezhinsk Physical-Technical Institute,
National Research Nuclear University MEPhI (Snezhinsk)
sbautin@usurt.ru

[2] Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor,
Department of Business Informatics and Mathematics,
Industrial University of Tyumen
agobukhov@inbox.ru

Abstract

This article presents the results of numerical simulation of free fire vortices arising in laboratory conditions. The authors demonstrate the possibility of obtaining such concentrated fire vortices in a series of experimental studies conducted under the supervision of A. Yu. Varaksin, a corresponding member of the Russian Academy of Sciences, at the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

The authors propose to consider the analytical and numerical studies of arising complex swirling gas flows during local heating of a metal underlying surface by several sources from the point of view of gas dynamics. When considering complex flows of a heating gas as a motion of a viscous, heat-conducting, and compressible continuous medium, the complete system of Navier — Stokes equations is used. The proposed initial-boundary conditions made

* This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (Project No 1.4539.2017/8.9).

Citation: Bautin S. P., Obukhov A. G. 2019. “Numerical simulation of complex gas flows in concentrated fire vortices”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 3, pp. 47-68.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-47-68

it possible to numerically determine the main gas-dynamic characteristics of the resulting three-dimensional and unsteady gas flows in free fire vortices.

The calculation results showed that during the formation of fiery vortices, several stages are distinguished in their development. The first stage is characterized by the occurrence of local gas flows diverging in the radial direction from the heating regions. The second stage is accompanied by the formation in the regions of the location of the heating sources of local vortices with opposite spin directions. The third stage is characterized by the fact that from smaller vortices due to the intense influx of external air a common large thermal vortex is formed, which receives a positive twist under the influence of the Coriolis force. At the fourth stage, with an increase in the rotation speed, a decrease in the vertical dimensions of the thermal vortex and its decay into several small ones is observed. Thus, the completion of the life cycle of one concentrated vortex is replaced by the formation of a new one. For the initial parameters, the lifetime of the concentrated thermal vortex is about one minute.

Keywords

Three-dimensional unsteady gas flow, fire vortices, complete system of Navier — Stokes equations, initial-boundary value problems, numerical solutions.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-47-68

REFERENCES

1. Barannikova D. D. 2017. “Mathematical numerical simulation of the temperature swirling air flows under the action of gravity and Coriolis”. Cand. Sci. (Phys.-Math.) diss. Tyumen. [In Russian]
2. Bautin S. P., Abdubakova L. V., Barannikova D. D., Kazachinsky A. O., Krutova I. Yu., Mezentsev A. V., Obukhov A. G., Sorokina E. M. 2015. “Mathematical and experimental modeling of ascending swirling flows”. Proceedings of the 11th All-Russian Conference on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics, pp. 378-380. Kazan. [In Russian]
3. Bautin S. P., Obukhov A.G. 2012. Mathematical Modeling of Destructive Atmospheric Vortices. Novosibirsk: Nauka. [In Russian]
4. Bautin S. P., Obukhov A. G. 2013. “On one type of boundary conditions when calculating three-dimensional unsteady flows of compressible viscous heat-conducting gas”. Izvestiya Vuzov. Oil and gas, no 5, pp. 55-63. [In Russian]
5. Bautin S. P., Obukhov A. G. 2013. “One exact stationary solution of the system of equations of gas dynamics”. Izvestiya vuzov. Oil and gas, no 4, pp. 81-86. [In Russian]
6. Bautin S. P. 1987. “Representation of the solutions of the Navier-Stokes system near the contact characteristic”. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol. 51, no 4, pp. 448-455. DOI: 10.1016/0021-8928(87)90083-9
7. Bautin S. P., Deryabin S. L., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. 2017. Destructive Atmospheric Whirlwinds and the Earth’s Rotation around Its Axis. Ekaterinburg: UrGUPS. [In Russian]

8. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G., Bautin K. V. 2013. Destructive Atmospheric Vortices: Theorems, Calculations, Experiments. Novosibirsk: Nauka; Ekaterinburg: UrGUPS Publishing House. [In Russian]
9. Bautin S. P., Obukhov A. G., Barannikova D. D. 2018.” Numerical Simulation of Fire Vortices with Consideration of Gravity and Coriolis Forces”. High Temperature, vol. 56, no 2. pp. 229-233. DOI: 10.1134/S0018151X18020025
10. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Taekin S. I., Kopeytsev V. N. 2009. “The generation of free concentrated air vortexes under laboratory conditions”. High Temperature, vol. 47, no 1, pp. 78-82. DOI: 10.1134/S0018151X09010106
11. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2009. “Controlling the behavior of air tornados”. High Temperature, vol. 47, no 6, pp. 836-842. DOI: 10.1134/S0018151X09060091
12. Varaksin A. Yu., Protasov M. V., Teplitsky Yu. S. 2014. “About choice of particle parameters for visualization and diagnostics of free concentrated air vortices”. High Temperature, vol. 52, no 4, pp. 554-559. DOI: 10.1134/S0018151X14040257
13. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N., Gorbachev M. A. 2012. “Method of impact on free nonstationary air vortices”. High Temperature, vol. 50, no 4, pp. 496-500. DOI: 10.1134/S0018151X12040219
14. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N., Gorbachev M. A. 2010. “Simulation of free heat vortexes: Generation, stability, control”. High Temperature, vol. 48, no 6, pp. 918-925. DOI: 10.1134/S0018151X10060209
15. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2010. “The possibilities of visualization in the case of simulation of air tornados”. High Temperature, vol. 48, no 4, pp. 588-592. DOI: 10.1134/S0018151X10040176
16. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2010. “The possibility of influencing vortex atmospheric formations”. High Temperature, vol. 48, no 3, pp. 411-415. DOI: 10.1134/S0018151X10030168
17. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2014. “On the possible generation of fire vortices without using forced spin”. Reports of the Academy of Sciences, vol. 456, no 2, pp. 159-161. DOI: 10.7868/S0869565214140102 [In Russian]
18. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N., Taekin S. I. 2008. “The possibility of physical simulation of air tornados under laboratory conditions”. High Temperature, vol. 46, no 6, pp. 888-891. DOI: 10.1134/S0018151X08060229
19. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N., Taekin S. I. “The parameters of unstable stratification of air leading to generation of free vortexes”. High Temperature, vol. 48, no 2, pp. 251-255. DOI: 10.1134/S0018151X10020173
20. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2011. Tornado [Tornado]. Moscow: Fizmatlit. [In Russian]
21. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N., Gorbachev M. A. 2011. “Physical simulation of air tornados: Some dimensionless parameters”. High Temperature, vol. 49, no 2, pp. 310-313. DOI: 10.1134/S0018151X11020155
22. Nalivkin D. V. 1984. Smerchi. Moscow: Nauka. [In Russian]
23. Nalivkin D. V. 1969. Hurricanes, Storms and Tornadoes. Geographical Features and Geological Activity. Leningrad: Nauka. [In Russian]

24. Obukhov A. G., Barannikova D. D. 2014. “Mathematical modelling and numerical calculation of the initial stage of forming the upward heat vortice”. Novoye slovo v nauke i praktike: gipotezy i aprobatsiya rezul’tatov issledovaniy, no 11, pp. 113-118. [In Russian]
25. Obukhov A. G., Barannikova D. D. 2014. “Features of gas flow in the initial stage of formation of a thermal ascending swirling flow”. Izvestiya vuzov. Oil and gas, no 6, pp. 65-70. [In Russian]
26. Obukhov A. G. 2019. “Calculations of thermodynamic characteristics of gas flows in the simulation of concentrated fire vortices”. Proceedings of the 21st International Conference on International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS 2019), pp. 525-527. Moscow. [In Russian]
27. Piralishvili Sh. A., Polnee V. M., Sergeev M. N. 2000. Vortex Effect. Experiment, Theory, Technical Solutions. Moscow: Energomash. [In Russian]
28. Sorokina E. M., Obukhov A. G. 2015. “Numerical calculation of the velocities of convective gas flow with a ring-shaped heating scheme”. Izvestiya vuzov. Oil and gas, no 3. pp. 84-90. [In Russian]
29. Obukhov A. G., Bautin S. P., Abdubakova L. V. 2015. “Numerical calculation of thermodinamic parameters unsteady three-dimensional rising swirling flow air”. Physical and Mathematical Sciences, no 2, pp. 16-24.
30. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N. 2013. “Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices”. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 64, pp. 817-828. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008
31. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Gorbachev M. A. 2012. “Method of impact on free nonstationary air vortices”. High Temperature, vol. 50, no 4, pp. 496-500. DOI: 10.1134/S0018151X12040219
32. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Taekin S. I., Kopeitsev V. N. 2009. “The generation of free air vortexes under laboratory condition”. High Temperature, vol. 47, no 1, pp. 78-82. DOI: 10.1134/S0018151X09010106
33. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Taekin S. I. 2008. “The possibility of physical simulation of air tornado under laboratory condition”. High Temperature, vol. 46, no 6, pp. 888-891. DOI: 10.1134/S0018151X08060229