

УДК 519.63+533.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОБОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕЙ

MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF GAS DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF FREE THERMAL AIR VORTEX

Д. Д. Баранникова, А. Г. Обухов

D. D. Barannikova, A. G. Obukhov

Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: газовая динамика; полная система уравнений Навье — Стокса;
начально-краевые условия; разностные методы*

*Key words: gas dynamics; complete system of Navier — Stokes equations;
initial-boundary conditions; difference methods*

В экспериментальных работах [1] с тепловыми восходящими потоками воздуха одновременно с вертикальным движением воздуха вверх наблюдается его закрутка в положительном направлении для Северного полушария и в отрицательном — для Южного. Подобное поведение течений воздуха наблюдается в природных торнадо и тропических циклонах [2].

В работах, упомянутых в [1], были исследованы тепловые режимы нагрева подстилающей поверхности, приводящие к генерации вихрей, а также проведена оценка их интегральных параметров (геометрических размеров, времени жизни, скорости перемещения и др.) с использованием видеосъемки. Получены пространственно-временные поля температур воздуха над подстилающей поверхностью, предложен и апробирован в лабораторных условиях метод воздействия на воздушные смерчи, заключающийся в расположении на пути их распространения препятствий в виде вертикальных и горизонтальных сеток. Кроме того, показана эффективность различных способов визуализации свободных концентрированных вихрей при исследовании их динамики в лабораторных условиях. Использование плоского светового ножа (лазерного ножа) совместно с визуализацией посредством частиц магнезии и дымовых частиц позволили исследовать вопросы формирования и развития вихрей. Проведена оценка параметра закрутки генерируемых в лабораторных условиях вихрей, установлено превышение вертикальной составляющей скорости над тангенциальными составляющими в исследуемых воздушных вихрях.

В работах [3–7] с помощью построения решений системы уравнений газовой динамики представлены результаты математического аналитического моделирования течений в разрушительных атмосферных вихрях типа торнадо и тропических циклонов. В частности доказано, что при наличии стока газа на вертикальном цилиндре ненулевого радиуса в рассматриваемом течении, внешнем по отношению к цилиндру, возникает закрутка воздуха в соответствующем направлении: положительном в Северном полушарии и отрицательном в Южном. Эти направления соответствуют направлениям закрутки атмосферных восходящих потоков типа торнадо и тропических циклонов. В целом ряде работ было показано, что для воз-

никновения закрутки в радиальном потоке газа не имеет значения способ организации стока — либо локальный нагрев, либо вертикальный продув [8–10]. Вторым способом инициирования восходящих закрученных потоков воздуха также подтвержден экспериментально [11].

Наряду с этим в работе [12] по численному моделированию тепловых восходящих закрученных потоков была обнаружена одна особенность поведения движущегося потока газа. В начальные моменты формирования восходящего закрученного потока при локальном нагреве нижней плоскости расчетной области на границе области нагрева возникают встречные потоки, имеющие противоположное направление закрутки. Это неизбежно приводит к возникновению в этой области нескольких локальных вихревых образований с противоположной направленностью вращения.

Цель данной работы — детальный анализ подобного поведения движущегося потока вязкого сжимаемого теплопроводного газа и расчет газодинамических характеристик восходящего закрученного потока при локальном нагреве подстилающей поверхности.

Для описания сложных течений вязкого сжимаемого теплопроводного газа, обладающего диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, используется полная система уравнений Навье — Стокса, которая, будучи записанной в безразмерных переменных с учетом действия силы тяжести и Кориолиса в векторной форме, имеет следующий вид [4, 6]:

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

где постоянные значения безразмерных коэффициентов вязкости и теплопроводности следующие: $\mu_0 = 0,001$, $\kappa_0 \approx 1,46\mu_0$.

В системе (1): ρ — плотность газа; $\mathbf{V} = (u, v, w)$ — вектор скорости газа с проекциями на соответствующие декартовы оси; t — время; x, y, z — декартовы координаты; T — температура газа; $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ — вектор ускорения силы тяжести; $\gamma = 1,4$ — показатель политропы для воздуха; $-2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} = (av - bw, -au, bu)$ — вектор ускорения силы Кориолиса, где $a = 2\Omega \sin \psi$, $b = 2\Omega \cos \psi$, $\Omega = |\boldsymbol{\Omega}|$; $\boldsymbol{\Omega}$ — вектор угловой скорости вращения Земли; ψ — широта точки O — начала декартовой системы координат $xyzO$, вращающейся вместе с Землей.

В качестве начальных условий при описании конкретного течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности принимаются функции, задающие точное решение [13] системы (1)

$$u = 0, v = 0, w = 0, \quad T_0(z) = 1 - kz, \quad (2)$$

$$k = \frac{l x_{00}}{T_{00}}, \quad l = 0,0065 \text{ К/м}, \quad x_{00} = 10 \text{ м}, \quad T_{00} = 288^\circ \text{ К},$$

$$\rho_0(z) = (1 - kz)^{\nu-1}; \quad \nu = \frac{\gamma g}{k} = \text{const} > 0. \quad (3)$$

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с длинами сторон $x^0 = 1$, $y^0 = 1$ и $z^0 = 0,2$ вдоль осей Ox , Oy и Oz соответственно.

Для плотности на четырех боковых гранях расчетного параллелепипеда $x = 0$, $x = x^0$, $y = 0$, $y = y^0$, берутся значения из стационарного начального распределения

$$\rho|_{x=0, x=x^0} = \rho_0(t, x, y), \quad \rho|_{y=0, y=y^0} = \rho_0(t, x, y),$$

а на нижней и верхней гранях $z = 0$, $z = z^0$ ставится условие непрерывности потока. Это означает, что значения плотности на границу области сносятся линейной интерполяцией по нормали к данной граничной поверхности из внутренней части расчетной области.

На боковых гранях расчетной области для всех компонент вектора скорости задаются условия непрерывности, то есть значения компонент скорости на границу области сносятся линейной интерполяцией по нормали к данной граничной поверхности из внутренней части расчетной области.

На верхней и нижней гранях задаются условия непротекания. При этом третья компонента скорости равна нулю $w|_{z=0, z=z^0} = 0$, а первая и вторая компоненты вектора скорости определяются из условия симметрии, то есть считаются из условия равенства нулю их производной по нормали к данной грани.

Для температуры на всех боковых гранях задаются значения из стационарного распределения

$$T|_{x=0, x=x^0} = T_0(t, x, y), \quad T|_{y=0, y=y^0} = T_0(t, x, y),$$

на верхней грани $z = z^0$ — из условия непрерывности.

На плоскости $z = 0$ температура задается функцией, моделирующей локальный нагрев подстилающей поверхности

$$T(x, y, t) = 1 + 0,6(1 - \exp(-10t)) \exp\left(-\frac{(x-0,5)^2 + (y-0,5)^2}{r_0^2}\right), \quad (4)$$

где r_0 — безразмерное значение радиуса области нагрева. В данной работе приводятся результаты расчета всех газодинамических параметров при диаметре пятна нагрева — 1 м и максимальной температуре в центре — 460,8 К.

Расчетная область заполняется трехмерной сеткой узлов пересечения трех семейств плоскостей $x = x_i$, $y = y_j$, $z = z_k$, где $x_i = i \cdot \Delta x$, $y_j = j \cdot \Delta y$, $z_k = k \cdot \Delta z$, $0 \leq i \leq L$, $0 \leq j \leq M$, $0 \leq k \leq N$. Разностные шаги по трем пространственным переменным $\Delta x = x^0 / L$, $\Delta y = y^0 / M$, $\Delta z = z^0 / N$.

Для аппроксимации производных по времени используются значения функции с двух последовательных временных слоев, а для аппроксимации производных по пространственным переменным — центральные разности значений функций.

Расчет трехмерного нестационарного течения ведется по явной разностной схеме переходом с очередного n -го временного слоя на следующий $n+1$ временной слой с постоянным заданным шагом Δt .

Значения всех искомых функций во внутренних точках всех двенадцати ребер прямоугольного параллелепипеда находятся как среднее арифметическое двух промежуточных значений, определенных линейной интерполяцией по значениям функций в двух точках на нормалях к ребру в каждой из граней.

Расчеты проводились при следующих входных параметрах: масштабные размерные значения плотности, скорости, расстояния и времени равны соответственно $\rho_{00} = 1,2928 \text{ кг/м}^3$, $u_{00} = 333 \text{ м/с}$, $x_{00} = 10 \text{ м}$, $t_{00} = x_{00} / u_{00} = 0,03 \text{ с}$. Безразмерное значение коэффициента вязкости $\mu_0 = 0,001$. Разностные шаги по трем пространственным переменным $\Delta x = \Delta y = 0,0$; $\Delta z = 0,02$, а шаг по времени $\Delta t = 0,001$.

В данной работе особый интерес представляют результаты расчета трех компонент скорости движения частиц газа и построенные на их основе мгновенные линии тока, являющиеся траекториями движения частиц газа в сложном течении восходящего закрученного потока. Интерес вызван обнаруженной при расчетах особенностью поведения движущегося потока газа в начальные моменты формирования восходящего закрученного потока при локальном нагреве нижней плоскости расчетной области.

По результатам расчетов отмечаются колебания максимальных значений температуры вблизи $300 \text{ }^\circ\text{K}$, которые с течением времени исчезают. Объясняются подобные колебания, по-видимому, переходными нестационарными процессами в изменениях газодинамических характеристик в возникающих сложных течениях газа при локальном нагреве.

Плотность газа в центре расчетной области имеет вид воронки, и форма ее существенных изменений с течением времени не претерпевает. Плотность достигает минимального значения $0,94$ на плоскости $z = 0$ и значения $0,97$ на высоте $0,4 \text{ м}$.

Расчеты показывают, что давление газа внутри области нагрева в начальные моменты времени возрастает, тогда как вне области нагрева давление газа пониженное. и с увеличением расстояния от центра области нагрева оно постепенно выходит на стационарные значения.

Из результатов расчетов следует, что в центре расчетной области давление имеет локальный максимум, вокруг которого формируется кольцеобразная область пониженного давления. Значения давления в данной области с течением времени периодически изменяются, но постепенно выходят на стационарный режим.

Движение газа, обусловленное изменением давления и температуры, можно описать следующим образом. До $30\text{--}35$ секунд газ движется от центра пятна нагрева к границам расчетной области, с 35 до 60 секунд возникает противоположно направленное движения газа, а к $2,5$ минутам появляется окружное движение.

Стоит отметить, что окружная скорость имеет достаточно большие значения. Вблизи нижней плоскости она составляет порядка 40 м/с , а вертикальная составляющая скорости близка к нулю.

На высоте $0,4 \text{ м}$ от нижней плоскости вертикальная компонента скорости имеет как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения третьей компоненты вектора скорости говорят о том, что вокруг восходящего потока в центре нагрева формируется нисходящее кольцеобразное течение.

В результате расчетов были построены линии тока, которые иллюстрируют поведение газа в начальные моменты времени. На рисунке представлен вид сверху на мгновенные линии тока участвующих в сложном движении частиц газа вблизи поверхности $z = 0$ в различные фиксированные моменты времени.

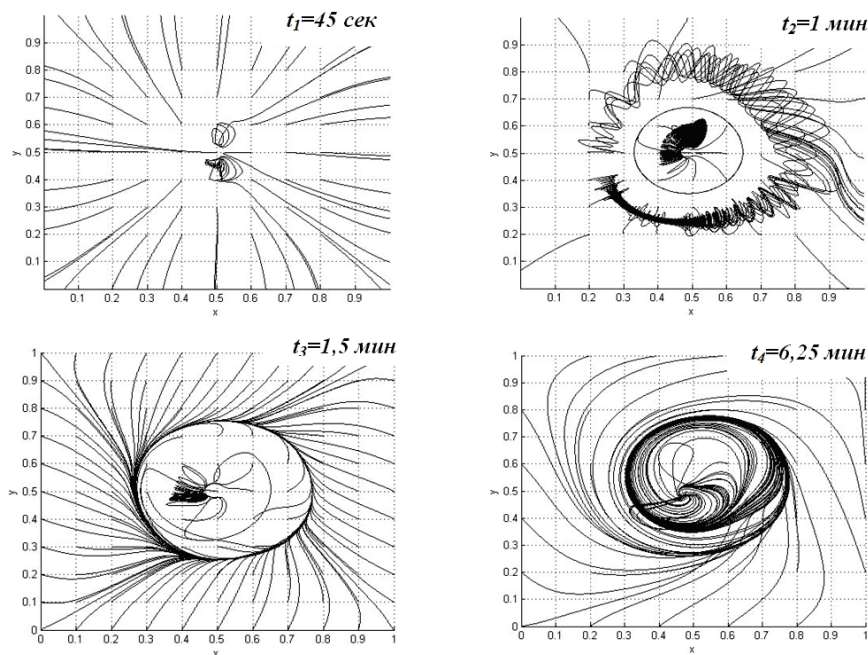


Рисунок. Вид сверху на линии тока частиц газа для четырех моментов времени

Таким образом, приведены результаты расчетов давления, плотности, температуры, всех компонент вектора скорости восходящего закрученного потока газа, вызванного локальным нагревом нижней плоскости. Построены мгновенные линии тока, являющиеся траекториями частиц газа в сложном течении восходящего закрученного потока. Результаты расчета показывают, что возникающие при локальном нагреве подстилающей поверхности течения воздуха имеют ярко выраженный, сложный нестационарный характер. Возникают потоки с противоположным направлением закрутки. Однако в конечном итоге преобладающим становится положительное направление закрутки всего потока.

Исследования поддержаны Министерством образования и науки РФ (проект № 1.4539.2017/8.9)

Список литературы

1. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. – М.: Физматлит, 2011. – 312 с.
2. Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. – Л.: Наука, 1969. – 487 с.
3. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука, 2008. – 96 с.
4. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси / С. П. Баутин [и др.] – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 336 с.
5. Баутин С. П., Крутова И. Ю. Закрутка газа при плавном стоке в условиях действия сил тяжести и Кориолиса // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50, № 3. – С. 473–475.
6. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты / С. П. Баутин [и др.] – Новосибирск: Наука, 2013. – 216 с.
7. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. – Новосибирск: Наука, 2012. – 152 с.
8. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 88–94.
9. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 57–62.
10. Обухов А. Г., Абдубакова Л. В. Численный расчет термодинамических характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. – 2014. – № 7. – С. 157–165.
11. Баутин К. В., Баутин С. П., Макаров В. Н. Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник УрГУПС. – 2013. – № 2 (18). – С. 27–33.

12. Обухов А. Г., Баранникова Д. Д. Особенности течения газа в начальной стадии формирования теплового восходящего закрученного потока // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 6. – С. 65–70.

13. Баутин С. П., Обухов А. Г. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 81–86.

Сведения об авторах

Баранникова Дарья Дмитриевна, старший преподаватель кафедры алгебры и математической логики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, тел. 89220700408, e-mail: lusy_and_jam@mail.ru

Обухов Александр Геннадьевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень тел. 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

Information about the authors

Barannikova D. D., Senior Lecturer at the Department of Algebra and Mathematical Logics, Tyumen State University, phone: 89220700408, e-mail: lusy_and_jam@mail.ru

Obukhov A. G., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department Business-informatics and mathematics, Industrial University of Tyumen, phone: 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

УДК 692.691

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ
РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
С УЧЕТОМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
В ФУНКЦИОНАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОМ ВИДЕ
IMPROVING THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF REPAIR
OF TRUNK PIPELINES WITH PRESENTATION OF INFORMATION
IN THE FUNCTIONAL ANALYTICAL FORM**

Ю. В. Колотилов, А. М. Короленок, С. В. Китаев

Yu. V. Kolotilov, A. M. Korolenok, S. V. Kitaev

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, г. Москва

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Ключевые слова: капитальный ремонт; магистральный трубопровод; система управления качеством продукции; единичный показатель качества; групповой показатель качества; интегральный показатель качества

Key words: repair; trunk pipeline; product quality management system; single indicator of quality; group indicator of quality; integrated indicator of quality

Для предметов материального производства совокупность их общественно полезных свойств выступает как потребительская стоимость, это означает, что товар удовлетворяет какой-либо общественной потребности. Таким образом, качество предмета, его способность удовлетворять потребностям, соответствующим его назначению, определяются совокупностью ограниченного количества свойств, определяющих возможность удовлетворения этих потребностей. Эти свойства, определяющие качество предмета, будем называть показателями качества [1, 2]. Оценка качества предмета — это оценка соответствия значений каждого показателя качества соответствующему требованию к предмету со стороны потребителя. Такую сопоставительную оценку будем называть уровнем качества предмета, а общественно оправданный уровень качества, зафиксированный в нормативных документах и обязательный для всех предприятий и организаций, изготавливающих продукцию, будем называть нормативным уровнем качества. Следовательно, нормативный уровень качества определяется набором нормативных документов, включающих требования к каждому показателю качества продукции. В сфере строительства такими нормативами являются государственные стандарты (ГОСТ), государственные стандарты России (ГОСТ Р), строительные нормы и правила (СНиП), технические условия (ТУ) и другие подобные документы [3–5].

При наличии установленного нормативного уровня качества качество единицы продукции определяется сопоставлением значений показателей качества этого