

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2019-5-108-114

УДК 519.63+533.6

Расчет скоростей течений газа в концентрированных огненных вихрях

А. Г. Обухов*, Л. И. Максимов

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: obuhovag@tyuiu.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования генерации свободных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования специальных закручивающих устройств. Принципиальная возможность физического моделирования возникновения концентрированных огненных вихрей описана в серии экспериментальных работ, проведенных под руководством члена-корреспондента РАН А. Ю. Вараксина.

В модели сжимаемой сплошной среды для полной системы уравнений Навье — Стокса предложена начально-краевая задача, описывающая сложные трехмерные нестационарные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в восходящих закрученных тепловых потоках. С помощью явных разностных схем и предложенных начально-краевых условий построены приближенные решения полной системы уравнений Навье — Стокса и численно определены скоростные характеристики трехмерных нестационарных течений газа, инициируемых локальным нагревом подстилающей поверхности 19 источниками тепла.

Ключевые слова: трехмерные нестационарные течения газа; система нелинейных дифференциальных уравнений; численные эксперименты и расчеты

Calculation of gas flow rates in concentrated fire vortices

Alexander G. Obukhov*, Lev I. Maksimov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: obuhovag@tyuiu.ru

Abstract. The article presents the results of numerical simulation of the generation of free fire vortices in the laboratory without the use of special twisting devices. A. Yu. Varaksin, the corresponding member of the Russian Academy of

Sciences, in his experimental studies has described the principal possibility of physical modeling of the occurrence of concentrated fire vortices.

In the model of a compressible continuous medium for the complete system of Navier — Stokes equations, an initial-boundary value problem has been proposed that describes complex three-dimensional unsteady flows of a viscous compressible heat-conducting gas in ascending swirling heat flows. We have constructed approximate solutions of the complete Navier — Stokes system of equations and have determined velocity characteristics of three-dimensional unsteady gas flows initiated by local heating of the underlying surface by nineteen heat sources, using explicit difference schemes and the proposed initial-boundary conditions.

Key words: three-dimensional unsteady gas flows; system of nonlinear differential equations; numerical experiments and calculations

Введение

Возможность физического моделирования свободных огненных вихревых структур в условиях лаборатории без специальных устройств для закручивания была продемонстрирована в экспериментальной работе [1]. Для возбуждения концентрированных вихревых структур была использована следующая установка. На подстилающей металлической поверхности размещались 19 таблеток уротропина, формируя вписанный в окружность диаметром 300 мм шестиугольник. Таблетки во время эксперимента поджигались, а в процессе их горения фиксировалось появление огненного вихря, высота которого значительно превосходила высоту пламени над каждой горящей таблеткой. Появление траекторий в виде винтовых линий у частиц продуктов сгорания являлось признаком генерации огненных вихревых структур. За один эксперимент возникает до 15 вихревых структур. При этом большинство вихрей функционирует в среднем до 5 секунд. Высота вихревых огненных структур равна 0,7 м, а их диаметр — 5 см.

Формирование огненных вихрей сопровождается существенным радиальным притоком окружающего воздуха к основному центральному конвективному потоку и закручиванием потока относительно вертикальной оси. Потоки продуктов сгорания в огненном вихре состоят из сложной комбинации тонких вихревых нитей, которые вращаются и взаимодействуют между собой.

Цель данной работы — численное моделирование генерации свободных огненных вихрей в условиях лаборатории без использования устройств принудительной закрутки и расчеты скоростных характеристик течений газа в таких огненных вихрях. Приведенные в работе результаты численных исследований продолжают и развивают сформулированное ранее направление численного исследования трехмерных нестационарных течений вязкого теплопроводного газа в тепловых закрученных потоках и огненных вихрях.

Математическая модель

Для численного моделирования сложных течений воздуха как сжимаемой сплошной среды, обладающей 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 вид [2–5]

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

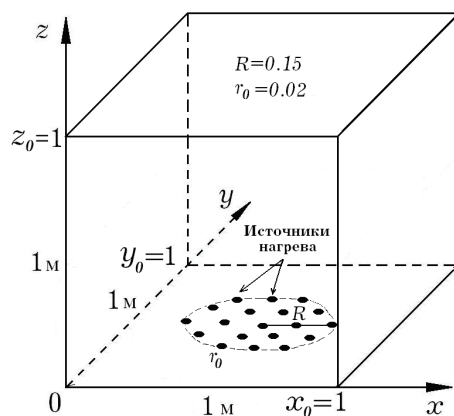
где $\mu_0 = 0,001$ и $\kappa_0 \approx 1,46\mu_0$ — значения постоянных безразмерных коэффициентов вязкости и теплопроводности.

Начальные условия при описании течений вязкого сжимаемого теплопроводного газа при постоянных значениях коэффициентов вязкости и теплопроводности представляют собой функции, задающие точное решение [6] системы (1):

$$k = \frac{l x_{00}}{T_{00}}, \quad l = 0,0065 \frac{K}{M}, \quad x_{00} = 1 M, \quad T_{00} = 288^\circ K, \quad (2)$$

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

Расчеты проводились в области, представляющей собой куб со сторонами $x_0 = y_0 = z_0 = 1$ (рис. 1).



Условия на границах расчетной области, а также способы вычисления газодинамических характеристик на ее гранях подробно описаны в работе [7].

На нижней грани $z=0$ для плотности ставится условие симметрии.

Это значит, что значения плотности на нижней грани рассчитываются из условия нулевой их производной по нормали к грани.

На боковых и верхней гранях значения скоростей подчиняются условиям непрерывности и рассчитываются линейной интерполяцией значений в двух ближайших узлах внутри области расчетов.

На нижней грани для скоростей задаются условия «непротекания». Вертикальная скорость приравняется нулю $w|_{z=0} = 0$, а две другие компоненты вычисляются из условия симметрии и из условия нулевой их производной по нормали к грани.

Температура на боковых и верхней гранях рассчитывается из условия непрерывности.

Постепенный нагрев 19 областей нижней грани до температуры 300 °С задается функциональной зависимостью от времени и координат

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

где $T^* = 0,99$; $r_0 = 0,02$ — значения радиусов областей нагрева; $x_l, y_l, l = 1 \div 19$ — координаты центров источников нагрева. Поставленные таким образом граничные условия моделируют течения сжимаемого газа, инициируемые нагревом нижней плоскости 19 источниками тепла. Граничные условия предполагают возможность пересечения газа всех граней области расчетов, исключая нижнюю. В расчетах использовались следующие масштабные значения: $\rho_{00} = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $u_{00} = 333 \text{ м/с}$, $x_{00} = 1 \text{ м}$, $t_{00} = x_{00} / u_{00} = 0,003 \text{ с}$. Дискретные шаги по трем координатам $\Delta x = \Delta y = 0,005$, $\Delta z = 0,05$, дискретный шаг по времени $\Delta t = 0,001$.

Результаты расчетов

Далее проводится анализ скоростей сложных течений газа, возникающих при нагреве нижней поверхности 19 источниками тепла. Рисунки 2–5 демонстрируют результаты расчетов компоненты u скорости течения газа при нагреве 19 источниками нижней грани. Представлены результаты для высоты 0,1 м для различных временных моментов. По осям абсцисс и ординат отложены номера узлов расчетной сетки.

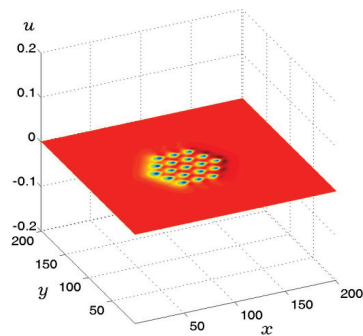


Рис. 2. Скорость u при $t_1 = 10 \text{ с}$

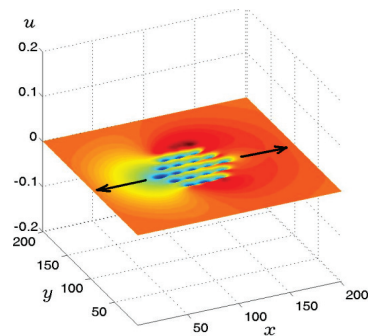


Рис. 3. Скорость u при $t_2 = 20 \text{ с}$

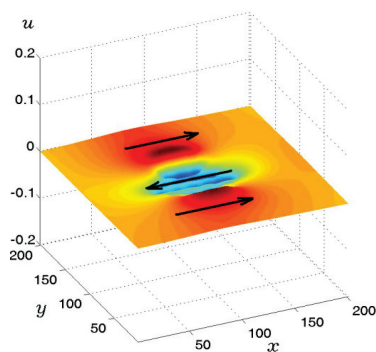


Рис. 4. Скорость u при $t_3 = 30$ с

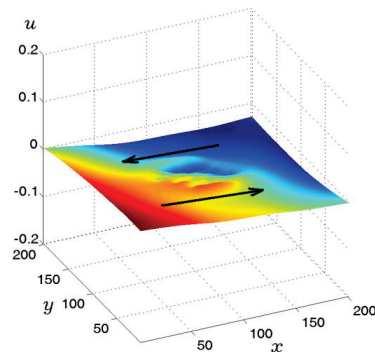


Рис. 5. Скорость u при $t_4 = 40$ с

По результатам выполненных расчетов первой компоненты скорости можно выделить несколько фаз развития тепловых вихревых структур. Первая фаза характерна появлением вблизи каждого из 19 источников тепла множества мелких вихревых образований с противоположным направлением закрутки (см. рис. 2). 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 (см. рис. 3). С наступлением третьей фазы возникают два вихря с противоположными направлениями вращения (см. рис. 4). Ближний к наблюдателю имеет положительное направление закрутки, а дальний 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 (см. рис. 5). В результате чего образуется огненный вихрь, наблюдаемый в экспериментах. Отмеченные этапы формирования огненного вихря размыты во времени. Однако отличительные черты каждого из указанных этапов формально дают возможность расположить их в определенной хронологической последовательности.

Как следует из расчетов, поведение второй v компоненты скорости аналогично описанному выше поведению первой. Графические зависимости от координат этой компоненты для таких же временных моментов изображены на рисунках 6–9.

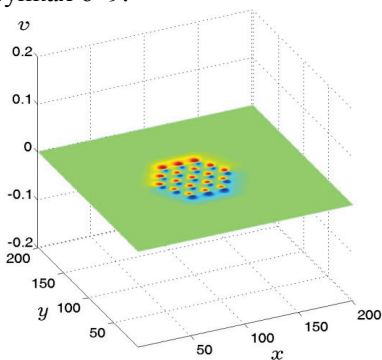


Рис. 6. Скорость v при $t_1 = 10$ с

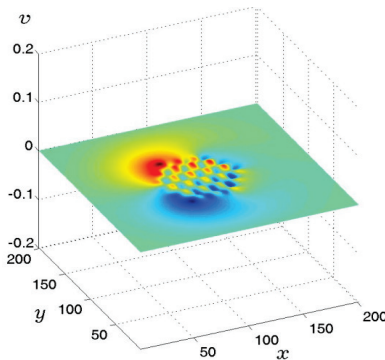


Рис. 7. Скорость v при $t_2 = 20$ с

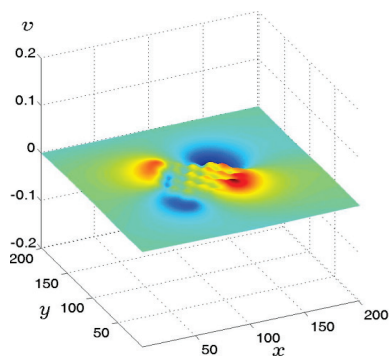


Рис. 8. Скорость v при $t_3 = 30$ с

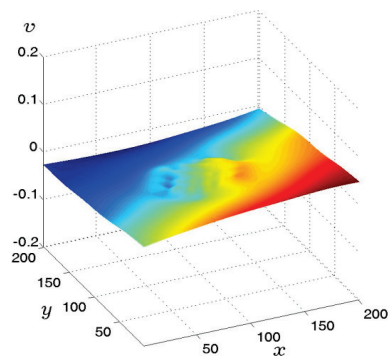


Рис. 9. Скорость v при $t_4 = 40$ с

На рисунках 10, 11 представлена третья w компонента скорости для временных моментов $t_1 = 10$ с и $t_4 = 40$ с для высоты 0,1 м от нижней поверхности.

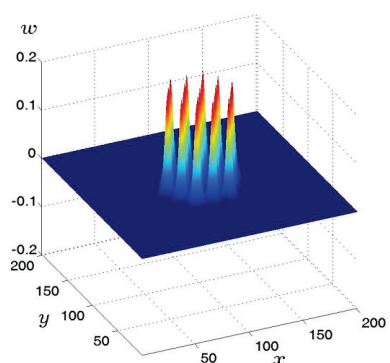


Рис. 10. Скорость w при $t_1 = 10$ с

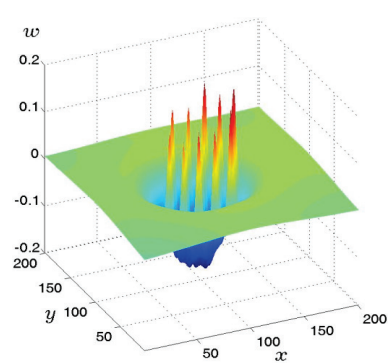


Рис. 11. Скорость w при $t_4 = 40$ с

Из рисунка 10 следует, что к моменту времени $t_1 = 10$ с имеет место формирование локальных вертикальных потоков воздуха над источниками нагрева. Максимальные значения скоростей (33 м/с) соответствуют расположению источников, а при удалении от них уменьшаются до нуля. В пространстве, расположенном вблизи от источников нагрева, вертикальная скорость имеет отрицательные значения, соответствующие движению вниз потока газа.

Выводы

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о сложной структуре возникающих течений, их ярко выраженной нестационарности. Рассчитаны скоростные характеристики течений в произвольные моменты времени.

Расчеты показали, что при формировании огненных вихрей можно выделить несколько характерных этапов, последовательная смена которых приводит к формированию общего крупного теплового вихря из мелких вихревых образований. Такой процесс происходит за счет притока внешнего воздуха, получающего положительную закрутку под действием силы Кориолиса. За счет существенного возрастания скорости закрутки наступает сокращение размеров с последующим распадом общего теплового вихря на более мелкие. Разлетом газа из области расчетов фактически заканчивается цикл жизни одного огненного вихря, а затем начинаются процессы формирования нового огненного вихря.

Расчеты показали, что при данных параметрах время жизни одного огненного закрученного потока составляет 1 минуту.

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

Библиографический список

1. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. О возможной генерации огненных вихрей без использования принудительной закрутки // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 456, № 2. – С. 159–161. DOI: 10.7868/S0869565214140102
2. Баутин С. П. Представление решений системы уравнений Навье — Стокса в окрестности контактной характеристики // Прикладная математика и механика. – 1987. – Т. 51, Вып. 4. – С. 574–584.
3. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. – Новосибирск: Наука, 2012. – 152 с.
4. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты / С. П. Баутин [и др.]. – Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – 215 с.
5. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси / С. П. Баутин [и др.]. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 336 с.
6. 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.
7. Баутин С. П., Обухов А. Г. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 55–64.

References

1. Varaksin, A. Yu., Romash, M. E., & Kopeytsev, V. N. (2014). O vozmozhnoy generatsii ognennykh vikhrey bez ispol'zovaniya prinuditel'noy zakrutki. Doklady Akademii nauk, 456(2), pp. 159-161. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869565214140102
2. Bautin, S. P. (1987). Predstavlenie resheniy sistemy uravneniy Nav'e - Stoksa v okrestnosti kontaktnoy kharakteristiki. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 51(4), pp. 574-584. (In Russian).
3. Bautin, S. P., Obukhov, A. G. (2012). Matematicheskoe modelirovanie razrushitel'nykh atmosferykh vikhrey. Novosibirsk, Nauka Publ., 152 p. (In Russian).
4. Bautin, S. P., Krutova, I. Yu., Obukhov, A. G., & Bautin, K. V. (2013). Razrushitel'nye atmosferynye vikhri: teoremy, raschety, eksperimenty. Novosibirsk, Nauka Publ., Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 215 p. (In Russian).
5. Bautin, S. P., Deryabin, S. L., Krutova, I. Yu., & Obukhov, A. G. (2017). Razrushitel'nye atmosferynye vikhri i vrashchenie Zemli vokrug svoey osi. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 336 p. (In Russian).
6. Bautin, S. P., Obukhov, A. G. (2013). A single exact stationary solution of the gas dynamics equations system. Oil and Gas Studies, (4), 81-86. (In Russian).
7. Bautin, S. P., Obukhov, A. G. (2013). About one type of boundary conditions at calculation of 3D unsteady-state-flow of compressible viscous heat-conducting gas. Oil and Gas Studies, (5), pp. 55-64. (In Russian).

Сведения об авторах

Обухов Александр Геннадьевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: obuho-vag@tyuiu.ru

Максимов Лев Игоревич, младший научный сотрудник Центра перспективных исследований и инновационных разработок, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Alexander G. Obukhov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Business Informatics and Mathematics, Industrial University of Tyumen, e-mail: obuho-vag@tyuiu.ru

Lev I. Maksimov, Junior Researcher at the Center for Advanced Research and Innovation, Industrial University of Tyumen