

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Сергей Петрович БАУТИН<sup>1</sup>  
Ирина Юрьевна КРУТОВА<sup>2</sup>  
Ольга Владимировна ОПРЫШКО<sup>3</sup>

УДК 533.6

### О ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ, СКОРОСТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры естественнонаучных дисциплин,  
Уральский государственный университет путей сообщения  
(г. Екатеринбург)  
sbautin@usurt.ru

<sup>2</sup> кандидат физико-математических наук, заведующая  
кафедрой высшей и прикладной математики,  
Снежинский физико-технический институт,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
iykrutova@mephi.ru

<sup>3</sup> аспирантка кафедры высшей и прикладной математики,  
Снежинский физико-технический институт,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
opryshko\_olga@mail.ru

---

**Цитирование:** Баутин С. П. О геометрических, скоростных и энергетических характеристиках придонных частей торнадо и тропических циклонов / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, О. В. Опрышко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 1. С. 55-67.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-55-67

---

**Аннотация**

Целью данной работы является изложение детальных аналитических и численных исследований сложных течений воздуха в разрушительных атмосферных вихрях. В частности, поскольку основная часть кинетической энергии торнадо и тропических циклонов сосредоточена в их придонных частях, то именно в этих областях подробно рассматриваются геометрические, скоростные и энергетические характеристики указанных течений.

В качестве математической модели использованы система уравнений газовой динамики и полная система уравнений Навье — Стокса при учете действия сил тяжести и Кориолиса. Благодаря соответствующим поставленным начальным и краевым условиям, численно и в аналитическом виде построены решения системы дифференциальных уравнений газовой динамики, учитывающие действие силы Кориолиса и моделирующие течения воздуха в придонных частях торнадо и тропического циклона. Построенные решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями.

При анализе этих решений строго математически установлено, что часть кинетической энергии вращения Земли переходит в кинетическую энергию вращательного движения этих течений, и вращательное движение не имеет других источников энергии.

Отмечается, что разрушительный характер имеют только те торнадо, у которых кинетическая энергия вращательного движения становится преобладающей в кинетической энергии всего потока.

С использованием результатов экспериментальных и теоретических исследований показана ошибочность предложения не учитывать вращение Земли для тех течений, для которых число Россби много больше единицы.

В работе также приведены расчеты трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа, являющихся соответствующими решениями полной системы уравнений Навье — Стокса при учете действия сил тяжести и Кориолиса. Ставилась начально-краевая задача, решения которой моделируют эксперимент с вертикальным продувом воздуха вверх по трубе большого диаметра. Нестационарные расчеты скоростных и энергетических характеристик проводились для различных скоростей вертикального продува вплоть до выхода возникающего закрученного течения воздуха на стационарный самоподдерживающийся режим функционирования.

**Ключевые слова**

Газовая динамика, полная система дифференциальных уравнений Навье — Стокса, сила Кориолиса, торнадо, тропический циклон, кинетическая энергия.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-55-67**

**Введение**

В природе довольно часто встречаются разрушительные атмосферные вихри — торнадо и тропические циклоны. В книгах [11, 8] приведены примеры таких

течений. Большое число исследователей активно занимаются проблемой торнадо и тропических циклонов (подробную библиографию см., например, в [8]). Однако к настоящему времени отсутствует (кроме предложенной в [6] и развитой в [2, 4, 5]) теория, которая бы убедительно раскрывала причины появления, функционирования и исчезновения торнадо и тропических циклонов. Тем более теория, подтвержденная экспериментально, адекватным математическим моделированием и сопоставлением с данными натуральных наблюдений за подобными потоками. Нет ответа, кроме как в [2, 4-6], и на вопрос об источнике энергии и месте ее вложения. Такое вложение энергии должно обеспечивать достаточно продолжительное существование рассматриваемых разрушительных атмосферных вихрей: торнадо до нескольких часов, тропических циклонов до нескольких суток.

### Основная часть

В качестве математической модели, чьи решения моделируют исследуемые течения, берется система уравнений газовой динамики для идеального газа, записанная в безразмерных переменных и учитывающая действие сил тяжести и Кориолиса [2, 4-6]:

$$\begin{cases} \rho_t + \mathbf{V} \cdot \Delta \rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \\ \mathbf{V}_t + (\mathbf{V} \cdot \Delta) \mathbf{V} + \frac{1}{\rho} \Delta p = \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}. \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1):  $\rho$  — плотность газа;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости частиц газа;  $p = \rho^\gamma/\gamma$  — давление;  $\gamma = \operatorname{const} > 1$  — показатель политропы;  $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ ,  $g = \operatorname{const} > 0$ ;  $\boldsymbol{\Omega}$  — вектор угловой скорости Земли. В работе рассматриваются изэнтропические течения.

Благодаря наличию в правой части векторного уравнения из системы (1) слагаемого  $(-2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V})$  в течение газа вносится дополнительный внешний импульс.

Некоторые исследователи предлагают [8] не учитывать вращения Земли, т. е. предлагают в системе (1) отбросить слагаемое  $(-2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V})$ , если число Россби:  $Ro = U/(2\Omega L)$  — много больше единицы. Здесь  $U$  — характерная скорость потока,  $L$  — характерный линейный размер,  $\Omega = |\boldsymbol{\Omega}|$ . Подобное предложение является ошибочным, поскольку, во-первых, для экспериментов [4, 5, 8] со свободными воздушными вихрями, закрутка которых вызвана только вращением Земли вокруг своей оси, число Россби имеет значение порядка семидесяти тысяч. А во-вторых, решения системы (1), приведенные и в [2, 4-6], в данной работе никаким образом не связаны с числом Россби, и в разных случаях этих решений число Россби для них принимает значения от нуля до плюс бесконечности.

Поскольку основная часть кинетической энергии торнадо и тропических циклонов сосредоточена в их придонных частях, то для моделирования течений в этих областях далее строятся стационарные решения при  $\partial/\partial t = 0$  системы (1), записанной в цилиндрических координатах:

$$\begin{cases} uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma-1)}{2}c\left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z\right) = 0, \\ uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_r = av - bwc\cos\varphi, \\ uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma-1)}\frac{c}{r}c_\varphi = -au + bws\sin\varphi, \\ uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_z = buc\cos\varphi - bvs\sin\varphi - g. \end{cases} \quad (2)$$

«Здесь  $c = \rho^{(\gamma-1)/2}$  — скорость звука газа;  $u, v, w$  — радиальная, окружная и вертикальная составляющие вектора скорости газа соответственно;  $a = 2\Omega\sin\psi$ ;  $b = 2\Omega\cos\psi$ ;  $\psi$  — широта точки на поверхности Земли, в которой лежит начало цилиндрической системы координат» [2, 4-6].

«В системах (1), (2) с помощью масштабных значений скорости, скорости звука, времени и расстояния —  $u_{00}, c_{00}, t_{00}, r_{00}$  — стандартным образом введены безразмерные переменные и положено» [2, 4-6]:

$$u_{00} = c_{00} = \frac{1}{3} \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Для системы (2) на горизонтальной непроницаемой плоскости  $z = 0$  ставятся следующие условия [2, 4-6]:

$$\begin{cases} c(r, \varphi, z)|_{z=0} = c_0(r, \varphi), \\ u(r, \varphi, z)|_{z=0} = u_0(r, \varphi), \\ v(r, \varphi, z)|_{z=0} = v_0(r, \varphi), \\ w(r, \varphi, z)|_{z=0} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

последнее из которых обеспечивает условие непротекания газа через плоскость  $z = 0$ .

Поставленная задача является характеристической задачей Коши [7], которая при задании условий

$$u(r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = u_{in} = \text{const} < 0; v(r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = 0 \quad (4)$$

и соответствующих условий согласования

$$u_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} = u_{in}, v_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} = 0$$

«является характеристической задачей Коши стандартного вида» [7], «имеющей единственное локально аналитическое решение» [4, 5].

«Приведенные условия (4) передают заданный на поверхности цилиндра  $r = r_{in}$  постоянный приток газа во внутреннюю область, ограниченную этим цилиндром. При этом на поверхности цилиндра притока  $r = r_{in}$  газ закрутку не имеет. В случае заданного притока газа внутрь цилиндра  $r = r_{in}$  обязательно надо будет вводить сток газа, например, при каком-то  $r = r_0, 0 < r_0 < r_{in}$ » [6].

Для существования решения задачи (2)-(4) также требуется выполнение необходимых условий, которые имеют вид системы обыкновенных дифференциальных уравнений для трех функций  $c_0, u_0, v_0$  [4, 5]:

$$\begin{cases} c_{0t} + u_0 c_{0r} + \frac{v_0}{r} c_{0\varphi} + \frac{(\gamma - 1)}{2} c_0 \left( u_{0r} + \frac{u_0}{r} + \frac{v_{0\varphi}}{r} \right) = 0, \\ u_{0t} + u_0 u_{0r} + \frac{v_0}{r} u_{0\varphi} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = a v_0, \\ v_{0t} + u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} + \frac{v_0}{r} v_{0\varphi} + \frac{2}{(\gamma - 1)} \frac{c_0}{r} c_{0\varphi} = -a u_0. \end{cases} \quad (5)$$

Решения системы (5) «описывают плоские течения, т. е. течения в плоскости  $z = 0$  и одновременно являются начальными слагаемыми ряда, который задает единственное аналитическое решение задачи (2)-(4)» [4].

Решения системы (5), не зависящие от переменной  $\varphi$  имеют следующий вид:

$$c(r) = \left[ \frac{A}{ru(r)} \right]^{(\gamma-1)/2};$$

$$F(r, u) \equiv \frac{2}{(\gamma-1)} \left( \frac{A}{ru} \right)^{(\gamma-1)} + u^2 - B + \frac{a^2 r_{in}^4}{4r^2} + \frac{a^2}{4} r^2 = 0; \quad (6)$$

$$v(r) = \frac{a(r_{in}^2 - r^2)}{2r}, v(r_{in}) = 0, v(r) \neq 0 \text{ при } r \neq r_{in};$$

$A, B, r_{in}$  — const. Функция  $u(r)$  задается в неявном виде с помощью второго соотношения из (6). Достаточное условие существования функции, неявно заданной функциональным уравнением  $F(r, u) = 0$ , имеет вид:  $r(u^2 - c^2) \neq 0$ . Следует заметить, что эффективнее определять значения функций  $c(r), u(r)$  не из формул (6), а при численном построении решений соответствующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений [2, 4-6]. Из третьей формулы решения (6) следует, что при конкретных значениях  $v, a, r_{in}$  число Россби для этого решения может принимать любые неотрицательные значения.

При построении решений системы (5) их необходимо согласовать с данными натуральных наблюдений за торнадо и тропическими циклонами [12-14]. Из этих данных взяты значения двух параметров:  $d = 2r_0$  — ширины полосы разрушения для торнадо или диаметра «глаза» для циклона;  $V(r_0)$  — скорость ветра при  $r = r_0$ .

В шкале Фудзиты [13] представлены данные для торнадо, проклассифицированных как  $F0, F1, \dots, F5$ . Для детализации расчетов здесь введены еще два течения, обозначенные как  $F_{-0,5}$  и  $F_{0,5}$ . Значения параметров  $d$  и  $V(r_0)$  для введенных течений сосчитаны интерполяцией по соответствующим значениям из шкалы Фудзиты [13]. Решения системы (5) строятся в плоскости  $z = 0$  в кольце

$$r_0 \leq r \leq r_{in}; r_0 > 0,$$

где  $r_0$  берется из таблицы 1.

Таблица 1

Данные натуральных наблюдений

Table 1

The field observations data

Классы торнадо, циклон	$F_{-0,5}$	$F_0$	$F_{0,5}$	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	$F5$	циклон
$d = 2r_0$ , м	2	5	10	16	51	161	547	1 609	60 000
Скорость ветра $V(r_0)$ , м/с	15	19	25,5	33	51	71	93	117	51

На внешней границе кольца задаются значения

$$c(t, r)|_{r=r_{in}} = 1; u(t, r)|_{r=r_{in}} = u_{in}; v(t, r)|_{r=r_{in}} = 0, \quad (7)$$

где  $u_{in} = \text{const} < 0$ . В расчетах безразмерное значение  $u_{in} = -0,0001$ , а масштабное значение скорости есть  $u_{00} = \frac{1}{3} \cdot 10^3$  м/с.

Условия (4) обеспечивают на внешней границе кольца при  $r = r_{in}$  постоянные значения скорости звука и радиального притока газа, а также отсутствие закрутки газа. При  $r = r_0$  имеет место сток газа, при  $0 \leq r < r_0$  течение не рассматривается. При построении решений системы (5) с условиями (4) значение  $r_{in}$  выбирается таким, чтобы для стационарных решений (6) выполнялось приближенное равенство:

$$\sqrt{u^2(r_0) + v^2(r_0)} \approx V(r_0),$$

где  $V(r_0)$  берется из таблицы 1.

При построении нестационарных решений системы (5) в области

$$t \geq 0; r_0 \leq r \leq r_{in}$$

модифицированным методом характеристик [2, 4, 5] задаются также и начальные условия:

$$c(t, r)|_{t=0} = 1; u(t, r)|_{t=0} = u_{in}; v(t, r)|_{t=0} = 0.$$

При  $t \geq 0$  на внутренней границе кольца при  $r = r_0$  задается значение радиальной скорости:

$$u(t, r)|_{r=r_0} = u(r_0) + [u_{in} - u(r_0)]e^{-Mt}; M = \text{const} > 0.$$

В таблице 2 приведены результаты расчетов плоских как стационарных, так и нестационарных течений. В том числе: найденные значения  $r_{in}$  для каждого течения; рассчитанные значения модуля скорости газа при  $r = r_0$ , практически совпадающие с заданными в таблице 1 скоростями ветра при  $r = r_0$ ; определенное время выхода каждого из течений на стационарный режим; вычисленные значения  $W$  — кинетических энергий стационарных потоков; найденные  $W_v/W$  —

Таблица 2

Результаты расчетов плоских течений

Table 2

Calculation Results for plane currents

Классы торнадо, циклон	$r_{in}$ , м	$[u^2(r_0)+v^2(r_0)]^{1/2}$ , м/с	Время выхода на стационар, ч	$W$ , Дж	$W_v/W$
$F_{-0.5}$	410	14,95	2,7	$1,100 \cdot 10^6$	0,149
$F_0$	975	19,01	3,1	$2,478 \cdot 10^7$	0,497
$F_{0.5}$	1 765	25,50	3,8	$0,307 \cdot 10^9$	0,764
$F1$	2 618	32,97	4,6	$1,895 \cdot 10^9$	0,877
$F2$	5 949	51,02	6,8	$0,096 \cdot 10^{12}$	0,973
$F3$	12 522	70,96	8,3	$3,560 \cdot 10^{12}$	0,994
$F4$	26 450	93,01	13,3	$1,322 \cdot 10^{14}$	0,9986
$F5$	50 890	116,98	13,6	$3,079 \cdot 10^{15}$	0,9996
циклон	175 100	51,01	27,4	$1,551 \cdot 10^{16}$	0,99997

отношения кинетической энергии вращающейся части конкретного потока к общей кинетической энергии этого конкретного потока.

Используя полученное конкретное решение (6), которое моделирует конкретные течения газа, сделаем обоснованный вывод о влиянии силы Кориолиса на подобные потоки.

Для этого рассмотрим задачу о радиальном стоке в плоскости  $z = 0$  в двух случаях:

- $\Omega = 0, v(r) \equiv 0;$
- $\Omega \neq 0, v(r) = a(r_{in}^2 - r^2)/(2r).$

Для конкретных значений  $r_{in}, r_0, V(r_0)$  соответствующих торнадо класса  $F1$  графики решения (6) приведены на рис. 1, 2, на которых кривые, соответствующие первому ( $\Omega = 0$ ) и второму ( $\Omega \neq 0$ ) случаям, помечены соответственно цифрами 1 и 2.

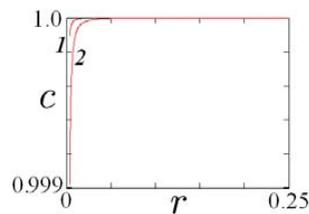


Рис. 1. Графики скорости звука и радиальной скорости

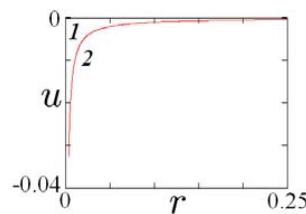


Fig. 1. Sound speed and radial velocity Graphs

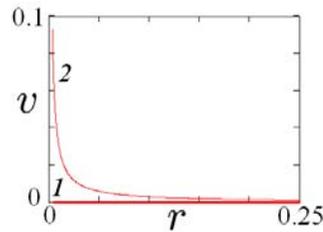


Рис. 2. Графики окружной скорости и траектория движения частицы газа

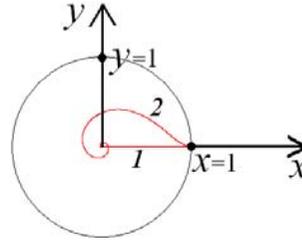


Fig. 2. Circumferential velocity and trajectory of a gas particle's motion Graphs

Графики скорости звука (левая часть рис. 1) качественно ведут себя одинаково, только во втором случае изменение  $c(r)$  в окрестности точки  $r = r_0$  принципиально более резкое и более значительное. Графики радиальной скорости (правая часть рис. 1) практически совпадают. Окружная скорость (левая часть рис. 2) в первом случае — тождественный нуль, во втором — график  $V(r)$  с ростом  $r$  — монотонно убывающая кривая, лежащая выше оси  $Or$ . На правой части рис. 2 приведены в плоскости  $xOy$  единичная окружность и траектории движения одной частицы газа, выходящей из точки  $(x = 1, y = 0)$ . Течение в первом случае является только радиальным, а во втором — закрученным. Очевидно, что во втором случае  $\Omega \neq 0$ , когда  $v(r) > 0$  при  $r_0 \leq r \leq r_{in}$ , кинетическая энергия потока больше, чем кинетическая энергия потока в первом случае  $\Omega = 0$ . Это увеличение кинетической энергии потока в случае, когда при построении решения учитывается вращение Земли вокруг своей оси, можно объяснить только следующим образом. За счет учета вращения Земли через учет в соответствии с законами механики действия силы инерции (силы Кориолиса) часть кинетической энергии вращения Земли переходит в кинетическую энергию вращающейся части построенного потока. И ничто другое в рассматриваемой задаче закрутить воздух не может.

Следовательно, решение (6) строго математически обосновывает, что создание и поддержание закрученного движения воздуха в торнадо и в тропических циклонах обеспечивает только вращение Земли вокруг своей оси (см. также [3, 4]).

Из результатов натуральных наблюдений, приведенных в таблицах, также следует, что исследуемые течения становятся разрушительными тогда, когда они имеют соответствующие геометрические и скоростные характеристики и когда с течением времени вращение Земли передаст им значительное количество кинетической энергии. Выявленная в результате натуральных наблюдений граница между не разрушительными и разрушительными восходящими закрученными потоками (торнадо класса  $F0$ ) совпала с границей, до которой кинетическая энергия вращающейся части потока меньше половины всей кинетической энергии потока. А после этой границы — больше половины. И доля кинетической энергии вращающейся части потока в его общей кинетической энергии растёт с увеличением интенсивности потока.

Таблица 3

Результаты расчетов трехмерных нестационарных течений

Table 3

The results of calculations of three-dimensional unsteady flows

Скорость продува, м/с	5	10	12	15	20
$W$ , Дж	$3,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^7$
$W_v / W$	0,19	0,22	0,45	0,58	0,97

Были также проведены в декартовой системе координат «численные расчеты трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа, являющихся соответствующими решениями полной системы уравнений Навье — Стокса при учете действия сил тяжести и Кориолиса» [4, 5, 7]. Ставилась начально-краевая задача [1], решения которой моделируют эксперимент с вертикальным продувом воздуха вверх по трубе [4, 5]. Прямоугольный параллелепипед, в котором строились трехмерные нестационарные течения, имел следующие размерные длины сторон основания и высоту:  $50 \text{ м} \times 50 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ . В центре верхней грани параллелепипеда в квадрате  $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$  задавалась различная вертикальная скорость продува воздуха вверх. От начального состояния неоднородного покоя поток в процессе счета практически выходил на стационарный режим. В таблице 3 приведены результаты расчетов [9, 10] при различных скоростях вертикального продува и введены обозначения:  $W$  — кинетическая энергия рассчитанного течения,  $W_v$  — кинетическая энергия окружного движения в этом течении.

Из приведенных результатов следует, что расчетами четко фиксируются скоростные характеристики рассматриваемых потоков с приведенными их геометрическими характеристиками, при которых значение дроби  $W_v / W$  больше или меньше величины  $1/2$ .

### Заключение

С использованием результатов экспериментальных и теоретических исследований показана ошибочность предложения не учитывать вращение Земли для тех течений, для которых число Россби много больше единицы.

Численно и в аналитическом виде построены решения системы дифференциальных уравнений газовой динамики, учитывающие действие силы Кориолиса, моделирующие течения воздуха в придонных частях торнадо и тропического циклона. Построенные решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями.

При анализе этих решений установлено, что часть кинетической энергии вращения Земли переходит в кинетическую энергию окружного движения этих течений, и у окружного движения нет другого источника энергии.

Отмечено, что разрушительный характер имеют те торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения становится больше кинетической энергии радиального движения.

Авторы благодарят А. Г. Обухова за полезное обсуждение данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдубакова Л. В. Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом / Л. В. Абдубакова, А. Г. Обухов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 5. С. 57-62.
2. Баутин С. П. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей / С. П. Баутин, А. Г. Обухов. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
3. Баутин С. П. Математическое обоснование влияния вращения Земли на торнадо и тропические циклоны / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Теоретическая и экспериментальная физика. 2017. т. 6. № 2. С. 101-107.
4. 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: Изд-во УрГУПС, 2017. 336 с.
5. 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.
6. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса / С. П. Баутин. Новосибирск: Наука, 2008. 92 с.
7. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике / С. П. Баутин. Новосибирск: Наука, 2009. 368 с.
8. Вараксин А. Ю. Торнадо / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев. М.: Физматлит, 2011. 312 с.
9. Волков Р. Е. Метод распараллеливания алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье-Стокса / Р. Е. Волков, А. Г. Обухов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 2. С. 92-98.
10. Волков Р. Е. Параллельные вычисления в исследованиях зависимости газодинамических параметров восходящего закрученного потока газа от скорости продува / Р. Е. Волков, А. Г. Обухов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 1. С. 92-97.
11. Наливкин Д. В. Смерчи / Д. В. Наливкин. М.: Наука, 1984. 112 с.
12. Emanuel K. A. A Statistical Analysis of Tropical Cyclone Intensity / K. A. Emanuel // Journal of the Atmospheric Sciences. 2000. V. 128. Pp. 1139-1152.
13. Tatom F. B. The Transfer of Energy from Tornado into the Ground / F. B. Tatom, S. J. Witton // Seismological Research Letter. 2001. V. 72. No 1. Pp. 12-21.
14. Tous M. Meteorological Environment Associated with Medicane Development / M. Tous, R. Romero // International Journal of Climatology. 2013. V. 33. Pp. 1-14.

Sergei P. BAUTIN<sup>1</sup>  
Irina Yu. KRUTOVA<sup>2</sup>  
Olga V. OPRYSHKO<sup>3</sup>

**ON THE GEOMETRY, VELOCITY,  
AND ENERGY CHARACTERISTICS  
OF THE BOTTOM PARTS OF TORNADOES  
AND TROPICAL CYCLONES**

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,  
Department of the Department of Natural Sciences,  
Ural State University of Railway Transport (Yekaterinburg)  
sbautin@usurt.ru

<sup>2</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department  
of Higher and Applied Mathematics, Snezhinsk Physic Institute  
of the National Research Nuclear University MEPhI  
iykrutova@mephi.ru

<sup>3</sup> Postgraduate Student, Department of Higher  
and Applied Mathematics, Snezhinsk Physic Institute  
of the National Research Nuclear University MEPhI  
opryshko\_olga@mail.ru

**Abstract**

This work aims to present detailed analytical and numerical studies of complex air currents in destructive atmospheric vortices. In particular, since the most of the kinetic energy of tornadoes and tropical cyclones is concentrated in their benthic parts, it is in these regions that the geometry, velocity, and energy characteristics of these flows are considered in detail.

As a mathematical model, a system of equations of gas dynamics and a complete system of Navier-Stokes equations are used, taking into account the action of gravity and Coriolis forces. Due to the initial and boundary conditions, the solutions of the system of differential equations of gas dynamics that take into account the effect of the Coriolis force and simulate air currents in the bottom parts of a tornado and a tropical cyclone are constructed numerically

---

**Citation:** Bautin S. P., Krutova I. Yu., Opryshko O. V. 2018. "On the Geometry, Velocity, and Energy Characteristics of the Bottom Parts of Tornadoes and Tropical Cyclones". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 1, pp. 55-67. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-55-67

---

and analytically. The solutions constructed are consistent with the data of field observations of these natural air currents.

When analyzing these solutions, it is strictly mathematically established that part of the kinetic energy of the Earth's rotation passes into the kinetic energy of the rotational motion of these currents, and the rotational motion has no other sources of energy. It is noted that only those tornadoes whose destructive kinetic energy becomes predominant in the kinetic energy of the entire stream are destructive.

Using the results of experimental and theoretical studies, the erroneousness of the proposal has been shown to ignore the rotation of the Earth for those flows for which the Rossby number is much greater than unity.

The paper also presents calculations of three-dimensional nonstationary flows of a compressible viscous heat-conducting gas, which are the corresponding solutions of the complete system of Navier-Stokes equations with allowance for the action of gravity and Coriolis forces. An initial-boundary problem was posed, the solutions of which simulate an experiment with vertical air blowing up the large diameter pipe. Nonstationary calculations of the velocity and energy characteristics were performed for various vertical blowing velocities up to the exit of the emerging swirling air flow to the stationary self-sustaining mode of operation.

### **Keywords**

System of equations of gas dynamics, complete system of Navier-Stokes equations, Coriolis force, tornado, tropical cyclone, kinetic energy.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-55-67**

### **REFERENCES**

1. Abdubakova L. V., Obukhov A. G. 2014. "Chislenny raschet termodinamicheskikh parametrov zakruchennogo potoka gaza, initsirovannogo kholodnym vertikal'nym produvom" [Numerical Calculation of the Thermodynamic Parameters of a Swirling Gas Flow Initiated by a Cold Vertical Blowing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, no 5, pp. 57-62.
2. Bautin S. P., Obukhov A. G. 2012. *Matematicheskoe modelirovanie razrushitel'nykh atmosferykh vikhrey* [Mathematical Modeling of Destructive Atmospheric Vortices]. Novosibirsk: Nauka.
3. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. 2017. "Matematicheskoe obosnovanie vliyaniya vrashcheniya Zemli na tornado i tropicheskie tsiklony" [Mathematical Substantiation of the Influence of the Earth's Rotation on Tornadoes and Tropical Cyclones]. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI". Teoreticheskaya i eksperimental'naya fizika*, vol. 6, no 2, pp. 101-107.
4. Bautin S. P., Deryabin S. L., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. 2017. *Razrushitel'nye atmosferynye vikhri i vrashchenie Zemli vokrug svoey osi* [Destructive Atmospheric Vortices and Rotation of the Earth around Its Axis]. Yekaterinburg: Izd-vo UrGUPS.
5. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G., Bautin K. V. 2013. *Razrushitel'nye atmosferynye vikhri: teoremy, raschety, eksperimenty* [Destructive Atmospheric Vortices:

- Theorems, Calculations, and Experiments]. Novosibirsk: Nauka; Yekaterinburg: Izd-vo UrGUPS.
6. Bautin S. P. 2008. Tornado i sila Koriolisa [Tornado and the Coriolis Force]. Novosibirsk: Nauka.
  7. Bautin S. P. 2009. Kharakteristicheskaya zadacha Koshi i ee prilozheniya v gazovoy dinamike [The Cauchy Problem and Its Applications in Gas Dynamics]. Novosibirsk: Nauka.
  8. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytsev V. N. 2011. Tornado [Tornadoes]. Moscow: Fizmatlit.
  9. Volkov R. E., Obukhov A.G. 2016. "Metod rasparallelivaniya algoritma chislennogo resheniya polnoy sistemy uravneniy Nav'e-Stoksa" [The Method of Parallelizing the Algorithm for the Numerical Solution of the Complete Navier-Stokes Equations System]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, no 2, pp. 92-98.
  10. Volkov R. E., Obukhov A. G. 2016. "Parallel'nye vychisleniya v issledovaniyakh zavisimosti gazodinamicheskikh parametrov voskhodyashchego zakruchennogo potoka gaza ot skorosti produva" [Parallel Computations in Studies of the Dependence of the Gasdynamic Parameters of an Ascending Swirling Gas Flow on the Speed of Blowing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, no 1, pp. 92-97.
  11. Nalivkin D. V. 1984. Smerchi [Tornadoes]. Moscow: Nauka.
  12. Emanuel K. A. 2000. "A Statistical Analysis of Tropical Cyclone Intensity". *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 128, pp. 1139-1152.
  13. Tatom F. B., Witton S. J. 2009. "The Transfer of Energy from Tornado into the Ground". *Seismological Research Letter*, vol. 72, no 1, pp. 12-21.
  14. Tous M., Romero R. 2013. "Meteorological Environment Associated with Medicane Development". *International Journal of Climatology*, vol. 33, pp. 1-14.