



**ЗНЧ** | ЗАБАБАХИНСКИЕ  
НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ |  
**2023**

# **Аналитическое и численное моделирование течений в придонных частях восходящих закрученных потоков при учете действия сил тяжести и Кориолиса**

**О.В. Опрышко, А.А. Бугаенко, А.О. Казачинский, И.Ю. Крутова**

Снежинск 2023

# Теория возникновения торнадо от поверхности Земли



2008г.: С.П. Баутин предложил теорию возникновения ВЗП от поверхности Земли. Баутин С.П. *"Торнадо и сила Кориолиса"*. Новосибирск: Наука, 2008.



2018г.: в докладе исследователя Я. Хаузер 13.12.2018 на заседании Американского географического союза представлены прямые доказательства возникновения торнадо на поверхности Земли до обнаружения вращения на высотах.

## Математическая модель

$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma - 1)}{2}c \left( u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0, \\ u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_r = \underline{av} - \underline{bw \cos \varphi}, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}\frac{c}{r}c_\varphi = \underline{-au} + \underline{bw \sin \varphi}, \\ w_t + uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_z = \underline{bu \cos \varphi} - \underline{bv \sin \varphi} - \underline{g}. \end{array} \right.$$

$r$  – полярный радиус,  $\varphi$  – полярный угол в плоскости  $xOy$ ;

$c = \rho^{(\gamma-1)/2}$  – скорость звука газа;  $\gamma = 1.4$ ;

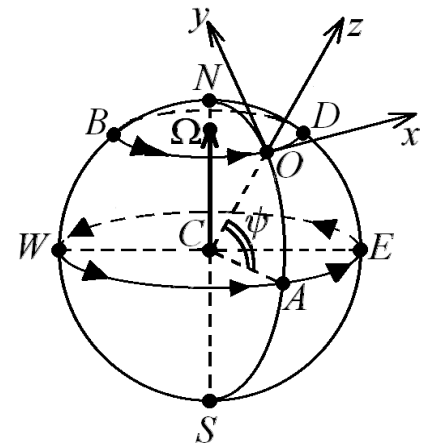
$u, v, w$  – радиальная, окружная и вертикальная составляющие  $V$ ;

$a = 2\Omega \sin \psi$ ;  $b = 2\Omega \cos \psi$ ,  $g = \text{const} > 0$  – ускорение свободного падения.

Уравнение состояния:  $p = \frac{1}{\gamma} A^2(S) \rho^\gamma$ ,

$A^2(S)$  – энтальпийная функция,  $\gamma = \text{const} > 1$ .

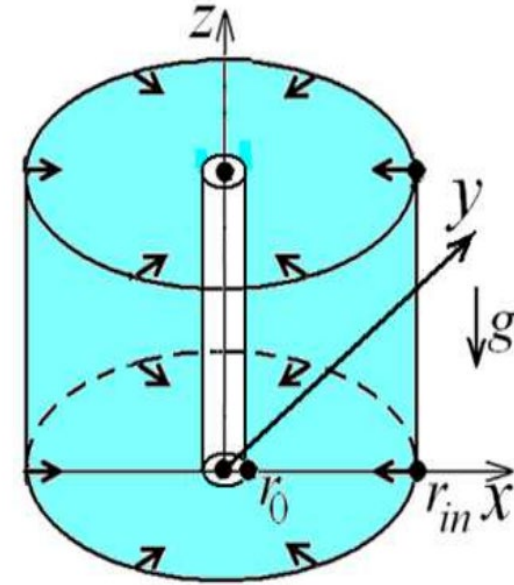
В случае изэнтропических течений газа:  $S = \text{const}$ .



# Стационарный случай

$$\left\{ \begin{aligned} uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma - 1)}{2}c \left( u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) &= 0, \\ uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_r &= \underline{av} - \underline{bw \cos \varphi}, \\ uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}\frac{c}{r}c_\varphi &= \underline{-au} + \underline{bw \sin \varphi}, \\ ww_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_z &= \underline{bu \cos \varphi} - \underline{bv \sin \varphi} - \underline{g}. \end{aligned} \right.$$

(1)



Уравнение состояния:  $\rho = \frac{1}{\gamma} A^2(S) \rho^\gamma,$

$A^2(S)$  – энтропийная функция,  $\gamma = \text{const} > 1$ .  
В случае изэнтропических течений газа:  $S = \text{const}$ .

$$\left\{ \begin{aligned} c(r, \varphi, z)|_{z=0} &= c_0(r, \varphi), \\ u(r, \varphi, z)|_{z=0} &= u_0(r, \varphi), \\ v(r, \varphi, z)|_{z=0} &= v_0(r, \varphi), \\ w(r, \varphi, z)|_{z=0} &= 0. \end{aligned} \right.$$

(2)

$$\left\{ \begin{aligned} u_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} &= u^o(\varphi, z)|_{z=0} = \text{const} < 0, \\ v_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} &= v^o(\varphi, z)|_{z=0} = 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Задача (1), (2) в безразмерных переменных.

## Цель исследования

Математическое моделирование придонной области вихря, повторяющей природное явление по данным натурных наблюдений и определение кинетической энергии потока с разработкой алгоритмов численных методов и системой компьютерного моделирования.

## Задачи исследования

1. Разработать математический метод моделирования течения газа в придонной части потока, определяющий газодинамические параметры торнадо в рамках математической модели для стационарного случая.
2. Разработать численный метод определения газодинамических параметров потока на основе математического метода моделирования придонного природного течения газа.
3. Реализовать разработанные алгоритмы численных методов в виде системы компьютерного моделирования.
4. Провести вычислительные эксперименты для определения газодинамических параметров потока и кинетической энергии с учетом известных данных натурных наблюдений за торнадо.

**Теорема 1. О необходимых условиях разрешимости.** Для того, чтобы модель (1), (2) в стационарном случае имела решение необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} u_0 u_{0r} + \frac{v_0 u_{0\varphi}}{r} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = a v_0, \\ u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} + \frac{v_0 v_{0\varphi}}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} \frac{c_0 c_{0\varphi}}{r} = -a u_0. \end{cases} \quad (3)$$

Эти уравнения являются необходимыми условиями разрешимости. Для случая, когда предполагается существование решения задачи (1), (2) в дополнении ко всему должны выполняться условия разрешимости. Коэффициенты  $c_0$ ,  $u_0$ ,  $v_0$  описывают плоское течение и одновременно являются слагаемыми ряда, который задает некоторое пространственное течение в окрестности непроницаемой плоскости  $z = 0$ .

**Теорема 2. О достаточных условиях разрешимости.** Пусть выполняются условия (4):

$$\begin{cases} u(r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = u^o(\varphi, z), \\ v(r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = v^o(\varphi, z); \quad r_{in} = \text{const} > 0, \end{cases} \quad (4)$$

и аналитические функции  $u^o(\varphi, z)$ ,  $v^o(\varphi, z)$ , согласованы с условиями (2) при значениях  $z = 0$ ,  $r = r_{in}$ :

$$\begin{cases} u_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} = u^o(\varphi, z)|_{z=0}, \\ v_0(r, \varphi)|_{r=r_{in}} = v^o(\varphi, z)|_{z=0}. \end{cases} \quad (5)$$

тогда задача (1), (2), (4), (5) имеет однозначную разрешимость при аналитическом виде входных данных и выполнении необходимых условий разрешимости, которое определяется в некоторой окрестности точки  $M_0$  с координатами  $(r = r_{in}, \varphi = \varphi_0, z = 0)$ , где  $\varphi_0$  – любое значение из отрезка  $[0, 2\pi]$ .

$$\mathbf{U}(r, \varphi, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{U}_k(r, \varphi) \frac{z^k}{k!}; \quad \mathbf{U}_k(r, \varphi) = \left. \frac{\partial^k \mathbf{U}(r, \varphi, z)}{\partial z^k} \right|_{z=0}, \quad (6)$$

где в качестве компонент вектора  $\mathbf{U}$  выступают искомые функции  $c, u, v, w$ .

$$\begin{aligned} c &= c_0 + c_1 z + c_2 \frac{z^2}{2} + c_3 \frac{z^3}{6} + c_4 \frac{z^4}{24}; & v &= v_0 + v_1 z + v_2 \frac{z^2}{2} + v_3 \frac{z^3}{6}; \\ u &= u_0 + u_1 z + u_2 \frac{z^2}{2} + u_3 \frac{z^3}{6}; & w &= w_0 + w_1 z + w_2 \frac{z^2}{2} + w_3 \frac{z^3}{6} + w_4 \frac{z^4}{24}. \end{aligned}$$

Для модели (1), (2) в стационарном случае рассматривается частный случай для радиальных течений, тогда полученная модель однозначно разрешима и решение имеет вид:

$$c_0(r) = \left[ \frac{A}{ru_0(r)} \right]^{(\gamma-1)/2},$$

$$F(r, u_0) \equiv \frac{2}{(\gamma-1)} \left( \frac{A}{ru_0} \right)^{(\gamma-1)} + u_0^2 - B + \frac{a^2 r_{in}^4}{4r^2} + \frac{a^2}{4} r^2 = 0,$$

$$v_0(r) = \frac{a(r_{in}^2 - r^2)}{2r}, \quad v(r_{in}) = 0, \quad v_0(r) \neq 0 \quad \text{при } r \neq r_{in},$$

$A, B, r_{in} - \text{const.}$

При этом, определяется вид коэффициента  $c_1$ :

$$c_1 = c_1(r, \varphi) = c_{10}(r) + c_{11}(r) \cos \varphi + c_{12}(r) \sin \varphi,$$

где

$$c_{10} = -g \frac{(\gamma-1)}{2} \frac{1}{c_0(r)}; \quad c_{11} = b \frac{(\gamma-1)}{2} \frac{u_0(r)}{c_0(r)}; \quad c_{12} = -b \frac{(\gamma-1)}{2} \frac{v_0(r)}{c_0(r)}.$$

При определенных первых коэффициентов ряда строится некоторое пространственное течение с параметрами  $c_0, u_0, v_0$ , находящегося в плоскости  $z = 0$ .



# Математический метод определения коэффициентов ряда

**Этап 1.** Для определения первых коэффициентов ряда осуществляется переход для модели (1), (2) в стационарном случае от уравнений с частными производными к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, а именно полагается  $z = 0$  и учитываются начальные условия.

**Этап 2.** Определяются вторые коэффициенты ряда – после дифференцирования системы (1) по переменной  $z$ , положенном  $z = 0$ , известных начальных условий и  $U_0, c_1, w_1$  с первого этапа.

**Этап 3.** Третьи коэффициенты ряда определяются после двукратного дифференцирования системы (1) по переменной  $z$ , положенном  $z = 0$  и известных  $U_0, U_1, c_2, w_2$  со второго этапа.

**Этап 4.** Четвертые коэффициенты ряда определяются после трехкратного дифференцирования системы (1) по переменной  $z$ , положенном  $z = 0$  и известных  $U_0, U_1, U_2, c_2, w_2, c_3, w_3$  с третьего этапа.

**Теорема 3.** Пусть параметры  $c_0, u_0, v_0, c_1, w_1$  ряда (6) однозначно определены, тогда все последующие коэффициенты представимы в виде конечных тригонометрических сумм вида (7), коэффициенты перед гармониками зависят от  $r$ :

$$w_k(r, \varphi) = w_{k,0}(r) + \sum_{j=1}^{k-1} [w_{k,2j-1}(r) \cos(j\varphi) + w_{k,2j}(r) \sin(j\varphi)]; \quad k = 2, 3, 4. \quad (7)$$

$$f_k(r, \varphi) = f_{k,0}(r) + \sum_{j=1}^k [f_{k,2j-1}(r) \cos(j\varphi) + f_{k,2j}(r) \sin(j\varphi)]; \quad k = 1, 2, 3.$$

где в качестве  $f$  выступают функции  $c, u, v$ .

При построении коэффициентов были получены рекуррентные соотношения, что в дальнейшем позволило последующие коэффициенты численно определить через предыдущие.

# Кинетическая энергия восходящего закрученного потока

Кинетическая энергия газа, движущегося в области

$$(D) : \{ r_0 \leq r \leq r_{in}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq h \}$$

$$W = \frac{1}{2} \iiint_{(D)} \rho(x, y, z) \vec{V}^2 dx dy dz = \frac{1}{2} \int_0^h \left\{ \int_0^{2\pi} \left[ \int_{r_0}^{r_{in}} \rho(r, \varphi) \vec{V}^2(r, \varphi) r dr \right] d\varphi \right\} dz,$$

$\vec{V}$  – вектор скорости газа.

$$W = \frac{1}{2} \int_0^h \left\{ \int_0^{2\pi} \left[ \int_{r_0}^{r_{in}} c^{\frac{2}{\gamma-1}}(r, \varphi, z) \left( u^2(r, \varphi, z) + v^2(r, \varphi, z) + w^2(r, \varphi, z) \right) r dr \right] d\varphi \right\} dz.$$

$$W = W_u + W_v + W_w.$$

Поскольку рассматриваются изэнтропические течения политропного газа:

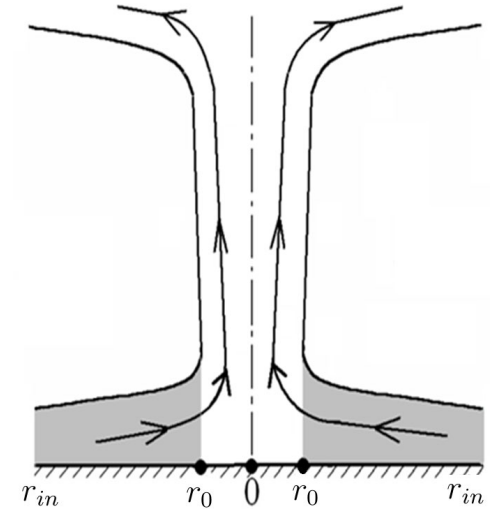
$$c^2(r) = \rho^{(\gamma-1)}, \quad \rho = c^{\frac{2}{\gamma-1}},$$

в случае воздуха  $\gamma = 1.4$

$$\rho = c^5(r).$$

## Шкала Фудзиты\*

Класс торнадо	Скорость ветра, м/с	Ширина следа, м $2r_0$	Средняя длина пути, км	Среднее время жизни, мин
F0	19-32	5-15	1.9	2.4
F1	33-50	16-50	4.2	5.2
F2	51-70	51-160	8.7	10.8
F3	71-92	161-508	16.1	20.0
F4	93-116	547-1448	43.8	54.4
F5	117-142	1609-4989	57.1	71.0



## Расширенная шкала Фудзиты\*\*

Класс торнадо	F00	F01	F10	F11	F20	F21	F30	F31	F40	F41	F50	F51	F52
Радиус стока $r_0$ , м	2.5	5	8	16.5	25.5	52.75	80.5	167.5	273.5	498.7	804.5	1649.5	2494.5
V, м/с	19	25.5	33	41.5	51	60.5	71	81.5	93	104.5	117	129.5	142

$$|\vec{V}|_{r=r_0} = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$$

\*Tatom F.B., Witton S.J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seismological Research Letter. -2001. –V.72. №1. – Pp.12-21.

\*\*Крутова, И.Ю. Расчеты газодинамических параметров в придонной части торнадо // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, №1. С. 17-24.

# Система компьютерного и имитационного моделирования

## Блок расчета радиуса притока



# Система компьютерного и имитационного моделирования

**Входные данные**  
**Класс торнадо,**  
**широта, число**  
**коэффициентов**  
**ряда, шаг сетки,**  
**высота придонной**  
**части потока**

Торнадо, стационарный случай

Выбор метод расчёта  
 Метод Рунге-Кутты

Величина шага интегрирования  
 0.000001  0.00001  0.0001

Выбор числа слагаемых ряда  
 1  2  3  4  5

Выбор широты, в градусах  
 30  45  60

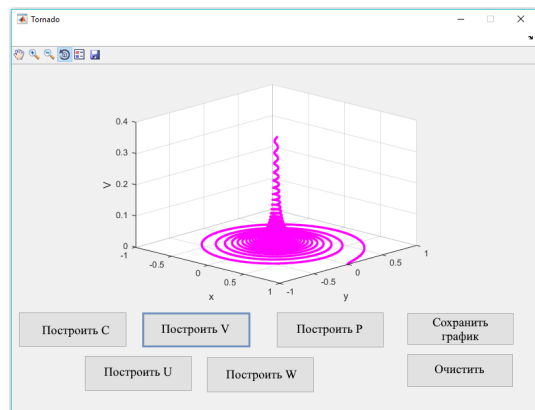
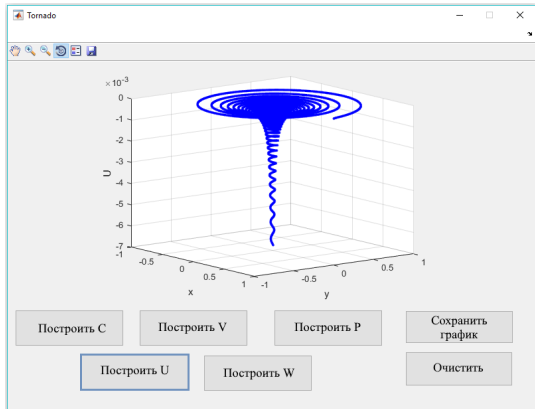
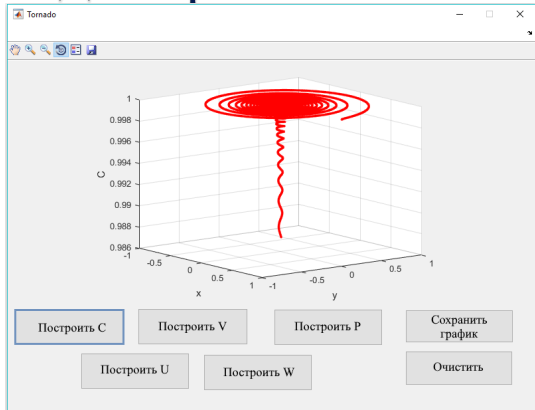
Выбор высоты, Z в метрах

Выбор класса торнадо  
 F00  
 F00  
 F01  
 F10  
 F11  
 F20  
 F21  
 F30  
 F31  
 F40  
 F41  
 F50  
 F51  
 F52  
 TC

Размерные единицы, МДж  
 Wu  Ww   
 Wv  W

Размерные единицы, м/с  
 C  V   
 U  W

ГД параметры и кинетическую энергию потока



Торнадо, стационарный случай

Выбор метод расчёта  
 Метод Рунге-Кутты

Величина шага интегрирования  
 0.000001  0.00001  0.0001

Выбор числа слагаемых ряда  
 1  2  3  4  5

Выбор широты, в градусах  
 30  45  60

Выбор высоты, Z в метрах

Выбор класса торнадо  
 F50

Размерные единицы, МДж  
 Wu 3,012E+04 Ww 7,764E+03  
 Wv 6,042E+06 W 6,080E+06

Размерные единицы, м/с  
 C 328,567 V 116,962  
 U 2,241 W 17,732

Расчитать ГД параметры и Кинетическую энергию потока

F50 30 100000 50 1 2

**Выходные данные**  
 $C_{r=r_0}, u_{r=r_0}, v_{r=r_0}, W_{r=r_0},$   
 $W_{U_{r=r_0}}, W_{V_{r=r_0}}, W_{W_{r=r_0}}, W_{r=r_0}$

# Скорость звука газа для торнадо F40 и тропического циклона

Таблица 1 - Скорость звука газа  $c_0$

Класс торнадо	$c_0$ , безразм.	$c_0$ , м/с разм.	$\downarrow c_0$ %	$\rho$ безразм.	$\downarrow \rho$ , %	$P(r_{in})$ , безразм.	$P(r_0)$ , безразм.	$\downarrow P$ , %
F00	0.999674	<b>332.891</b>	0.03	0.998	<b>0.2</b>	0.714	0.712	<b>0.23</b>
F10	0.999018	<b>332.673</b>	0.10	0.995	<b>0.5</b>	0.714	0.709	<b>0.68</b>
F20	0.997651	<b>332.217</b>	0.23	0.988	<b>1.2</b>	0.714	0.703	<b>1.70</b>
F30	0.995444	<b>331.483</b>	0.50	0.977	<b>2.3</b>	0.714	0.692	<b>3.15</b>
F40	0.992164	<b>330.390</b>	0.80	0.961	<b>3.9</b>	0.714	0.676	<b>5.30</b>
F50	0.987581	<b>328.865</b>	1.26	0.939	<b>6.1</b>	0.714	0.654	<b>8.40</b>
ТЦ	0.997469	<b>332.157</b>	0.25	0.987	<b>1.3</b>	0.714	0.702	<b>1.80</b>

F40

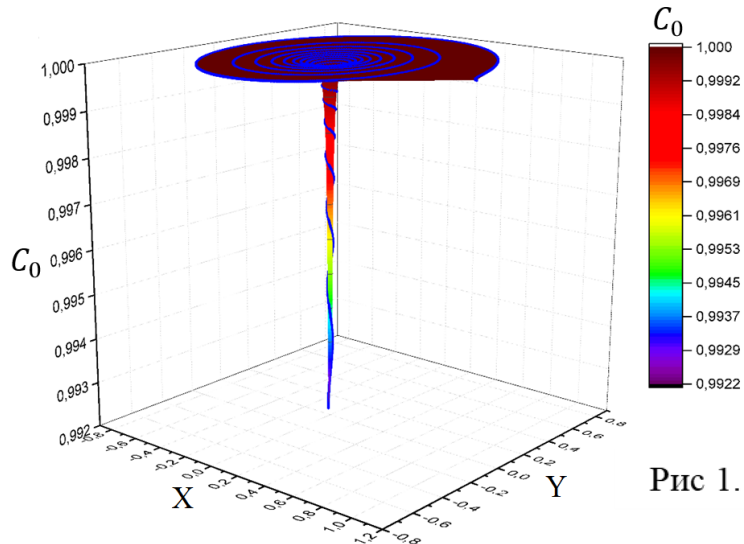
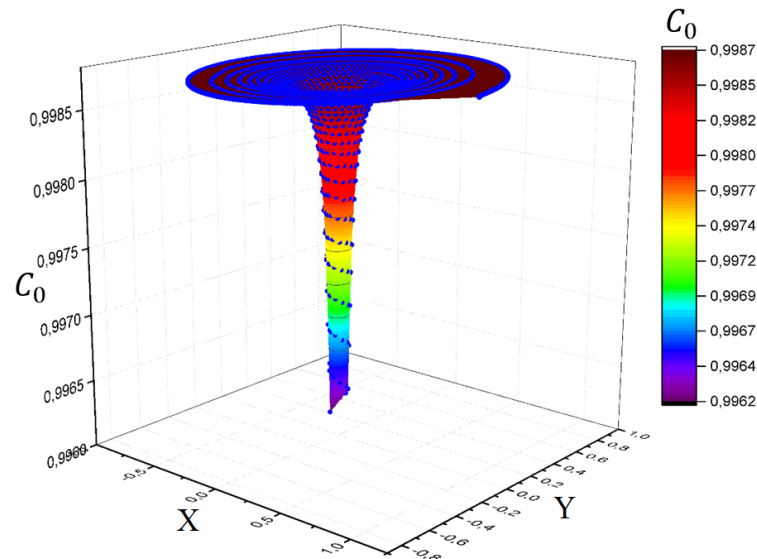


Рис 1.  $c_0$



ТЦ

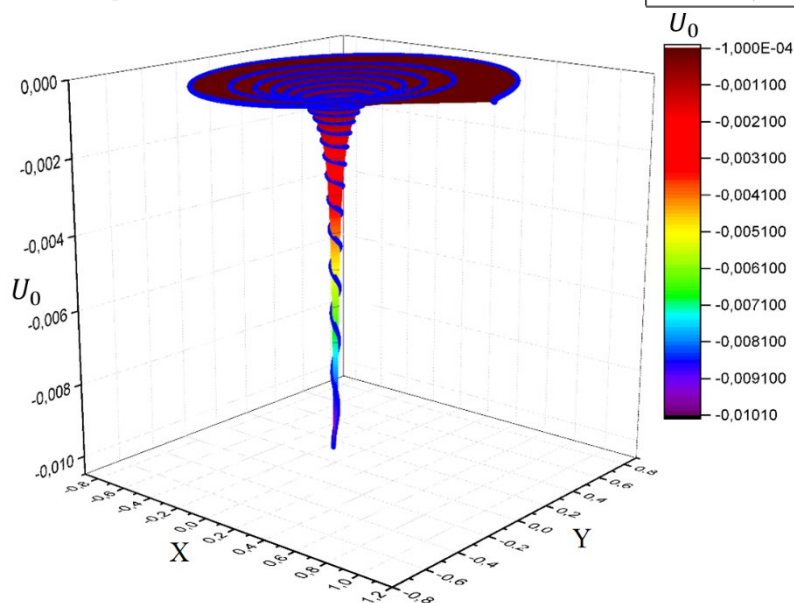
В центре ВЗП находится область пониженного давления. С увеличением класса торнадо на большую величину изменяется  $c_0$ , на большую величину снижается давление.

# Радиальная скорость для торнадо F40 и тропического циклона

Таблица 2 - Радиальная скорость газа

Класс торнадо	$u_0$ безразм.	$u_0$ разм., м/с
F00	0.039104	<b>-13.021</b>
F10	0.032874	<b>-10.947</b>
F20	0.023593	<b>-7.856</b>
F30	0.015915	<b>-5.299</b>
F40	0.010059	<b>-3.350</b>
F50	0.006733	<b>-2.242</b>
ТЦ	0.002026	<b>-0.675</b>

F40



ТЦ

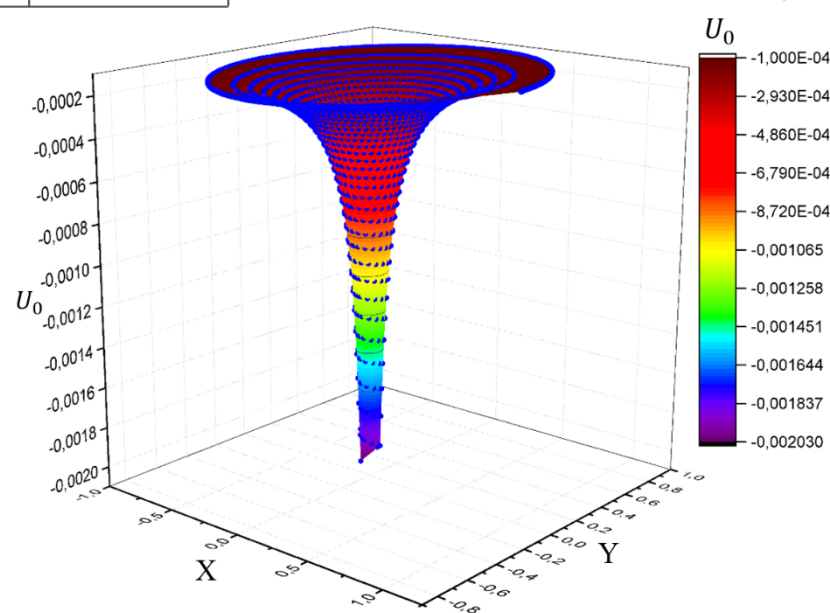


Рис 2.  $u_0$

Радиальная скорость ветра имеет отрицательный знак - направлена в центр ВЗП. Наличие области пониженного давления ускоряет стремление газа в центр ВЗП. С увеличением класса торнадо уменьшается значение радиальной скорости.

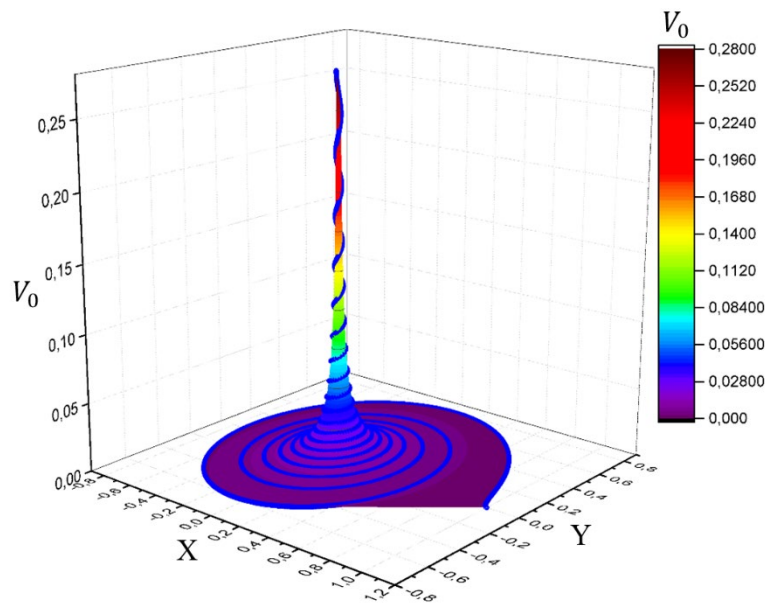


# Окружная скорость для торнадо F40 и тропического циклона

Таблица 3 - Окружная скорость газа

Класс торнадо	$v_0$ безразм.	$v_0$ разм., м/с
F00	0.041593	<b>13.850</b>
F10	0.093449	<b>31.119</b>
F20	0.151343	<b>50.397</b>
F30	0.212615	<b>70.800</b>
F40	0.279195	<b>92.972</b>
F50	0.351241	<b>116.963</b>
ТЦ	0.158974	<b>52.938</b>

F40



ТЦ

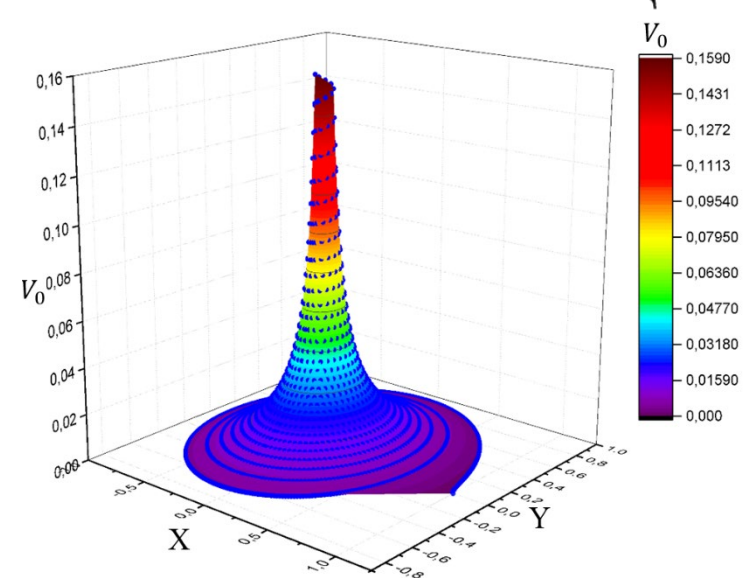


Рис. 3  $v_0$

Положительное значение окружной скорости ветра говорит о том, что закрутка газа идет против часовой стрелки.

С увеличением класса торнадо увеличивается окружная скорость ветра.

# Вторые коэффициенты ряда, торнадо F40 и ТЦ, скорость звука газа

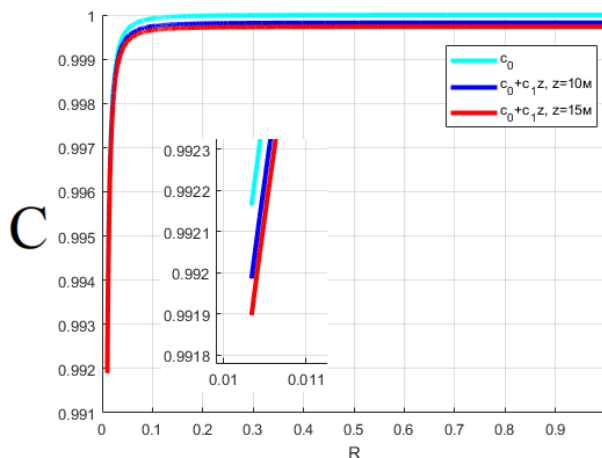
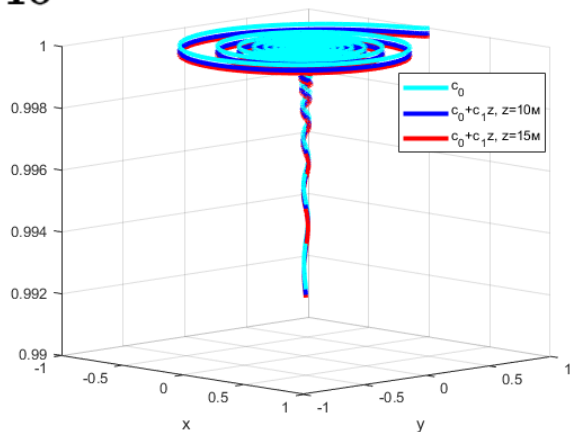
Обозначим:  $c_0 + c_1 z$ , при  $z = 10$  м как  $C_{h_1}$ ,  
 $c_0 + c_1 z$ , при  $z = 15$  м как  $C_{h_2}$ .

$z = 10$  м - высота флюгера, с учетом  
 неровностей Земной поверхности.

Таблица 4 - Скорость звука газа торнадо

Класс торнадо	$c_0$ безразм.	$c_0$ , м/с разм.	$C_{h_1}$ безразм.	$C_{h_1}$ , м/с разм.	$C_{h_1} - c_0$ м/с (%)	$C_{h_2}$ безразм.	$C_{h_2}$ , м/с разм.	$C_{h_2} - c_0$ м/с (%)
F00	0.999674	<b>332.891</b>	0.999497	<b>332.833</b>	0.058(0.02)	0.999409	<b>332.803</b>	0.088(0.026)
F10	0.999018	<b>332.673</b>	0.998841	<b>332.614</b>	0.059(0.02)	0.998753	<b>332.585</b>	0.088(0.026)
F20	0.997651	<b>332.217</b>	0.997474	<b>332.159</b>	0.059(0.02)	0.997385	<b>332.129</b>	0.088(0.026)
F30	0.995444	<b>331.483</b>	0.995266	<b>331.424</b>	0.059(0.02)	0.995178	<b>331.394</b>	0.089(0.027)
F40	0.992164	<b>330.390</b>	0.991986	<b>330.331</b>	0.058(0.02)	0.991897	<b>330.302</b>	0.088(0.027)
F50	0.987581	<b>328.865</b>	0.987402	<b>328.805</b>	0.060(0.02)	0.987313	<b>328.775</b>	0.090(0.027)
ТЦ	0.997469	<b>332.157</b>	0.997292	<b>332.098</b>	0.059(0.02)	0.997203	<b>332.069</b>	0.088(0.026)

F40



Относительная погрешность между базовыми вычислительными экспериментами и вычислительными экспериментами на высоте флюгера не превышает 0.02%.

Относительная погрешность между вычислительными экспериментами  $C_{h_2}$  и базовыми не превышает 0.03%.

ТЦ

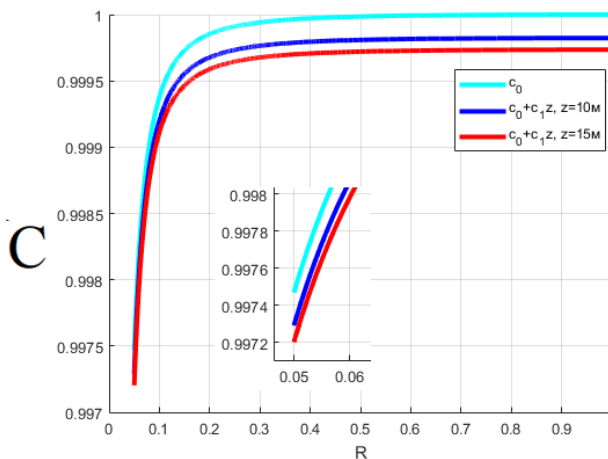
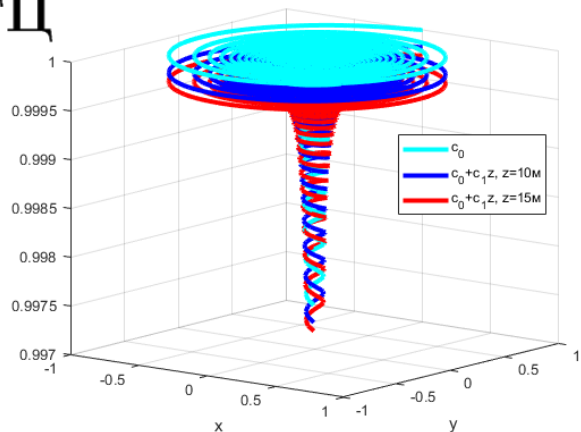


Рис. 5  $c_0 + c_1 z$

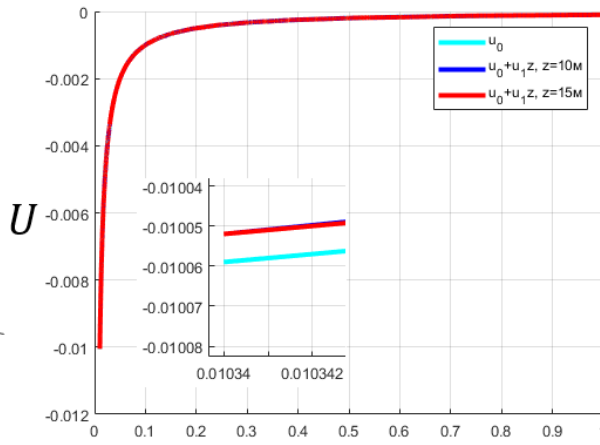
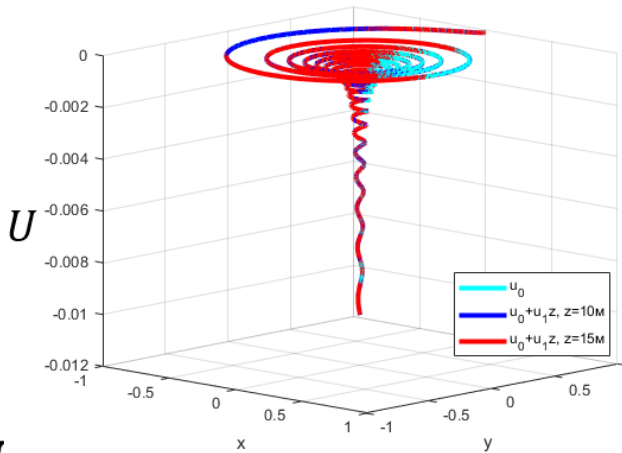
# Радиальная скорость, торнадо F40 и ТЦ

Обозначим:  $u_0+u_1z$ , при  $z = 10$  м как  $U_{h_1}$ ,  
 $u_0+u_1z$ , при  $z = 15$  м как  $U_{h_2}$ .

Таблица 5 - Радиальная скорость газа торнадо

Класс торнадо	$u_0$ безразм.	$u_0$ , м/с разм.	$U_{h_1}$ безразм.	$U_{h_1}$ , м/с разм.	$ U_{h_1} - u_0 $ м/с (%)	$U_{h_2}$ безразм.	$U_{h_2}$ , м/с разм.	$ U_{h_2} - u_0 $ м/с (%)
F00	0.039104	<b>13.021</b>	-0.039116	<b>13.026</b>	0.004(0.03)	-0.039127	<b>13.029</b>	0.008(0.06)
F10	0.032874	<b>10.947</b>	-0.032878	<b>10.948</b>	0.001(0.01)	-0.032873	<b>10.947</b>	0.000(0.00)
F20	-0.023593	<b>7.856</b>	-0.023580	<b>7.852</b>	0.004(0.05)	-0.023577	<b>7.851</b>	0.005(0.006)
F30	-0.015915	<b>5.299</b>	-0.015907	<b>5.297</b>	0.002(0.04)	-0.015907	<b>5.297</b>	0.002(0.04)
F40	-0.010059	<b>3.350</b>	-0.010052	<b>3.347</b>	0.003(0.08)	-0.010052	<b>3.347</b>	0.003(0.08)
F50	-0.006733	<b>2.242</b>	-0.006731	<b>2.241</b>	0.001(0.04)	-0.006731	<b>2.241</b>	0.001(0.04)
ТЦ	-0.002026	<b>0.675</b>	-0.002026	<b>0.675</b>	0.000(0.00)	-0.002026	<b>0.675</b>	0.000(0.00)

Б10



Относительная погрешность между базовыми вычислительными экспериментами и вычислительными экспериментами на высоте флюгера не превышает 0.08%.

Относительная погрешность между вычислительными экспериментами  $U_{h_2}$  и базовыми не превышает 0.08%.

ТЦ

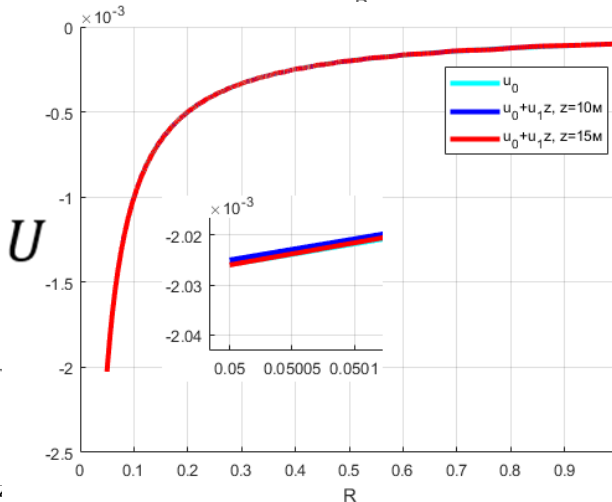
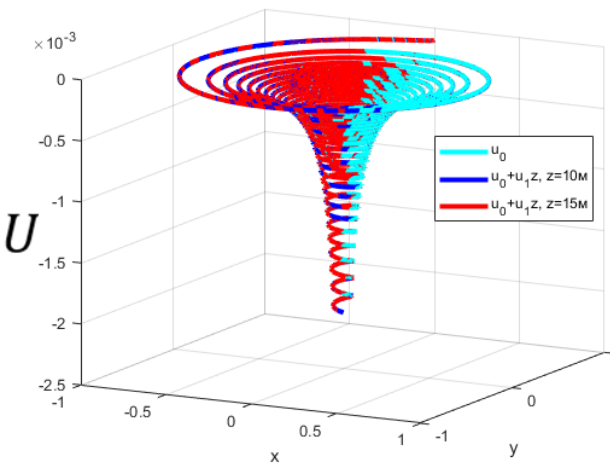


рис. 5  $u_0 + u_1z$

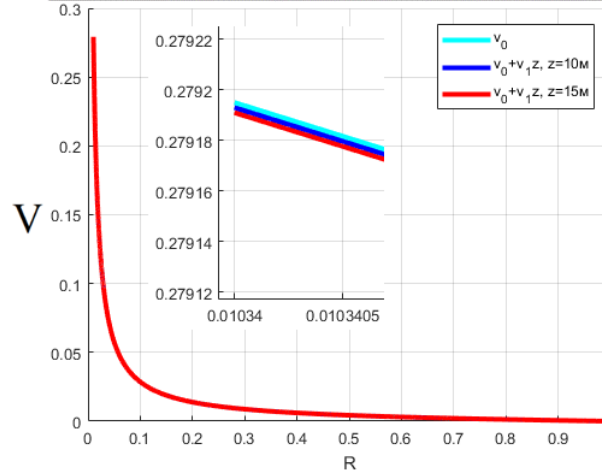
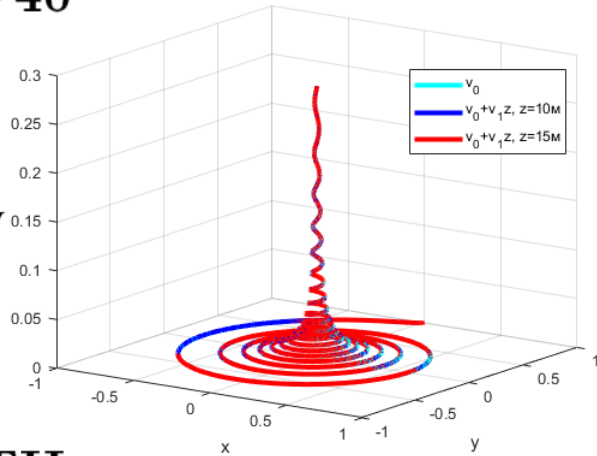
# Окружная скорость, торнадо F40 и ТЦ

Таблица 6 - Окружная скорость газа торнадо

Класс торнадо	$v_0$ безразм.	$v_0$ , м/с разм.	$V_{h_1}$ безразм.	$V_{h_1}$ , м/с разм.	$ V_{h_1} - v_0 $ м/с (%)	$V_{h_2}$ безразм.	$V_{h_2}$ , м/с разм.	$ V_{h_2} - v_0 $ м/с (%)
F00	0.041593	<b>13.850</b>	0.041583	<b>13.848</b>	0.002(0.010)	0.041573	<b>13.844</b>	0.006(0.04)
F10	0.093449	<b>31.119</b>	0.093448	<b>31.118</b>	0.001(0.003)	0.093451	<b>31.119</b>	0.000(0.00)
F20	0.151343	<b>50.397</b>	0.151348	<b>50.399</b>	0.002(0.004)	0.151350	<b>50.400</b>	0.001(0.002)
F30	0.212615	<b>70.800</b>	0.212613	<b>70.800</b>	0.000(0.000)	0.212612	<b>70.800</b>	0.000(0.00)
F40	0.279195	<b>92.972</b>	0.279193	<b>92.971</b>	0.001(0.001)	0.279191	<b>92.971</b>	0.001(0.001)
F50	0.351241	<b>116.963</b>	0.351240	<b>116.963</b>	0.000(0.000)	0.351240	<b>116.963</b>	0.000(0.00)
ТЦ	0.158974	<b>52.938</b>	0.158972	<b>52.938</b>	0.000(0.000)	0.158971	<b>52.938</b>	0.000(0.00)

Обозначим:  $v_0 + v_1 z$ , при  $z = 10$  м как  $V_{h_1}$   
 $v_0 + v_1 z$ , при  $z = 15$  м как  $V_{h_2}$ .

## F40



Относительная погрешность между вычислительными экспериментами  $V_{h_1}$  и базовыми не превышает 0.01%.

Относительная погрешность между вычислительными экспериментами  $V_{h_2}$  и базовыми не превышает 0.04%.

Наибольшая разница приходится на класс торнадо F00 – у этого класса наименьшее  $r_0$  и  $v_0$ .

## ТЦ

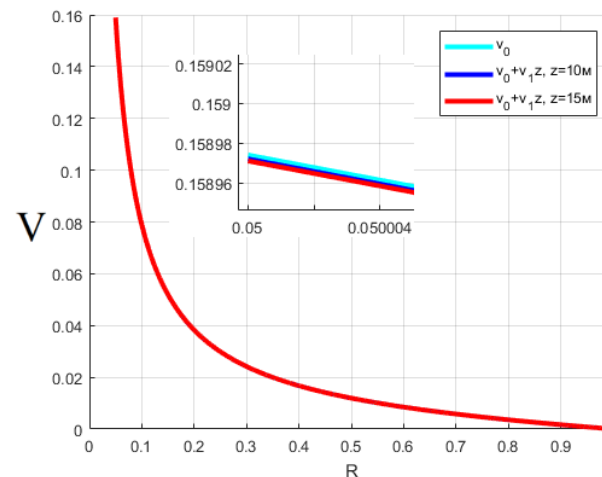
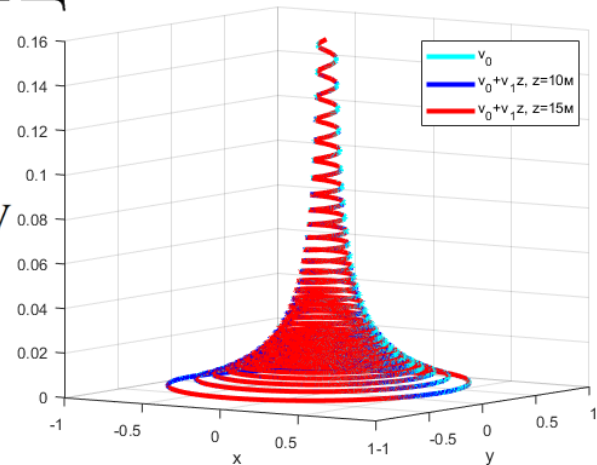
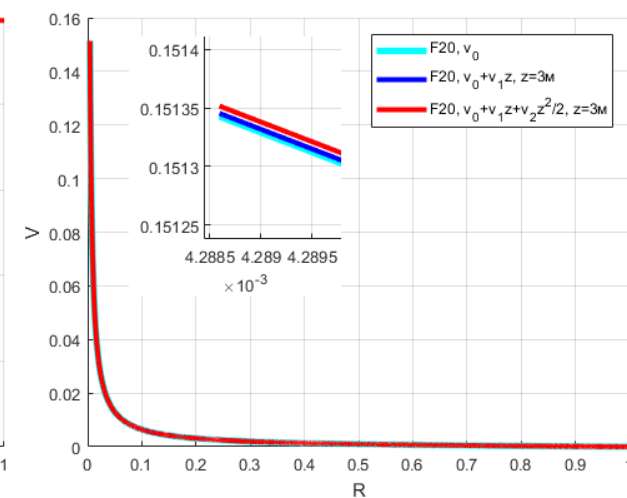
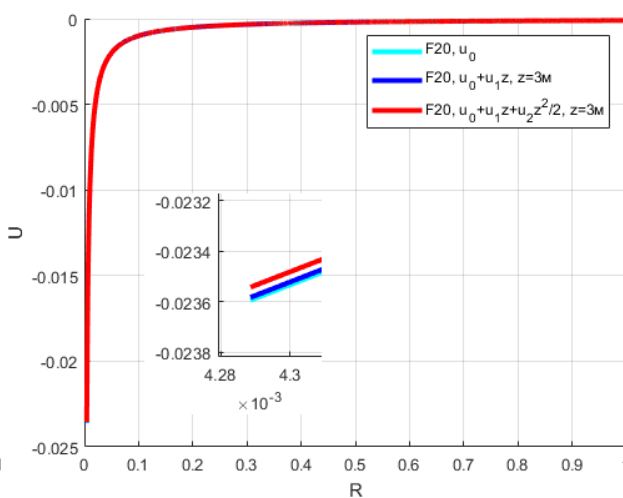
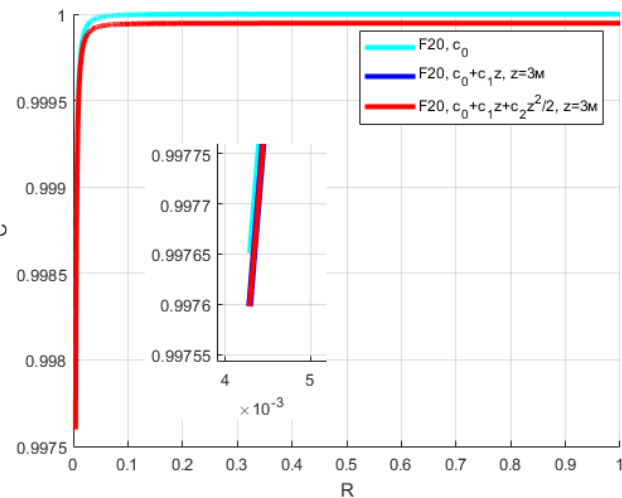


Рис. 7  $v_0 + v_1 z$

# Вычислительные эксперименты, торнадо F20



$c_0$  – базовый эксперимент

$c_0 + c_1z$ , при  $z = 3$  м как  $C_{h_3}$

$c_0 + c_1z + c_2z^2/2$ ,  $z = 3$  м как  $C_{h_4}$

$u_0$  – базовый эксперимент

$u_0 + u_1z$ , при  $z = 3$  м как  $U_{h_3}$

$u_0 + u_1z + u_2z^2/2$ ,  $z = 3$  м как  $U_{h_4}$

$v_0$  – базовый эксперимент

$v_0 + v_1z$ , при  $z = 3$  м как  $V_{h_3}$

$v_0 + v_1z + v_2z^2/2$ ,  $z = 3$  м как  $V_{h_4}$

Скорость звука газа, радиальная и окружная скорости газа для  $z = 3$  метра.

Класс торнадо	$c_0$ безразм.	$C_{h_4}$ безразм.	$ C_{h_4} - c_0 (\%)$ безразм.	$u_0$ безразм.	$U_{h_4}$ безразм.	$ U_{h_4} - u_0 (\%)$ безразм.	$v_0$ безразм.	$V_{h_4}$ безразм.	$ V_{h_4} - v_0 (\%)$ безразм.
F00	0.99967	0.99962	5.0E-05(0.005)	-0.03910	-0.03910	5.0E-08(0.0001)	0.041592	0.041594	2.0E-06(0.005)
F10	0.99902	0.99896	6.0E-05(0.006)	-0.03287	-0.03286	1.0E-05(0.03)	0.093448	0.093454	6.0E-06(0.006)
F20	0.99765	0.99759	6.0E-05(0.006)	-0.02359	-0.02354	6.0E-05(0.25)	0.151342	0.151351	9.0E-06(0.006)
F30	0.99544	0.99539	5.0E-05(0.005)	-0.01591	-0.015734	2.0E-04(1.26)	0.212614	0.212626	1.2E-05(0.006)
F40	0.99216	0.99211	5.0E-05(0.005)	-0.01005	-0.009433	6.0E-04(5.97)	0.279195	0.279213	1.8E-05(0.006)
F50	0.98758	0.98753	5.0E-05(0.005)	-0.00673	-0.005157	1.6E-03(23.77)	0.351240	0.351260	2.0E-05(0.006)
ТЦ	0.99747	0.99742	5.0E-05(0.005)	-0.00203	-0.001358	6.6E-04(32.51)	0.158973	0.158980	7.0E-06(0.004)

## Кинетическая энергия потока

Таблица 4: Кинетическая энергия для базового расчета, широта  $\pi/6$

Класс торнадо	$W_U$ МДж	$W_V$ МДж	$W$ МДж	$W_V/W$
F00	2.560E-01	2.540E-01	5.100E-01	0.4980
F01	8.220E-01	2.658E+00	3.480E+00	0.7638
F10	1.787E+00	1.268E+01	1.447E+01	0.8763
F11	4.615E+00	8.746E+01	9.207E+01	0.9499
F20	8.690E+00	3.150E+02	3.237E+02	0.9731
F21	2.040E+01	1.809E+03	1.830E+03	0.9885
F30	3.572E+01	5.655E+03	5.690E+03	0.9939
F31	8.049E+01	3.008E+04	3.016E+04	0.9974
F40	1.447E+02	9.988E+04	1.000E+05	0.9988
F41	2.811E+02	3.919E+05	3.922E+05	0.9992
F50	4.873E+02	1.211E+06	1.212E+06	0.9992
ТЦ	7.205E+02	3.417E+06	3.418E+06	0.9997
F51	1.026E+03	5.658E+06	5.659E+06	0.9998
F52	1.636E+03	1.472E+07	1.472E+07	0.9999

# Выводы

1. Проведено математическое моделирование течения воздуха в придонной части восходящих закрученных потоков, повторяющее данные натуральных наблюдений, что позволило определить кинетическую энергию потока при формировании торнадо от поверхности Земли.
2. Разработан численный метод определения газодинамических параметров потока и кинетической энергии для математической модели, учитывающей формирование потока от поверхности Земли.
3. В виде системы компьютерного моделирования реализованы разработанные алгоритмы и проведены вычислительные эксперименты по данным натурным наблюдений за торнадо.

Спасибо за внимание!