

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ С РАЗУМНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2021 г. С. П. Баутин^{1,*}, В. Е. Замыслов^{2,**}, А. Г. Обухов^{3,***}

¹ Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Челябинской области, 456776, Россия

² Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, 620034, Россия

³ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, 625000, Россия

*e-mail: spbautin@mail.ru

**e-mail: zamislov2017@yandex.ru

***e-mail: agobukhov@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 12.04.2022 г.

Ранее обоснована схема возникновения и функционирования восходящих закрученных потоков, которые в природе встречаются в виде торнадо и тропических циклонов. Показано, что причиной естественной закрутки восходящего потока воздуха в этих потоках является вращение Земли вокруг своей оси. Также математически строго доказано, что кинетическая энергия этого вращательного движения воздуха берется только из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси. Установлено, что при прекращении восходящего движения воздуха в закрученных потоках вращение Земли будет закручивать поток в другую сторону и разрушать его вращательное движение. С учетом ранее полученных аналитических результатов в данной работе проведено моделирование движения воздуха в подобных потоках численными методами. А именно, трехмерными нестационарными расчетами моделируются течения в тропическом циклоне с газодинамическими параметрами течения и его линейными размерами, соответствующим данным натурных наблюдений. Рассчитано возникновение потока и его переход в стационарное состояние за конкретное время. После заданного внешнего энергетического воздействия на циклон расчетами установлено разрушение тропического циклона и переход течения воздуха в нем в неструктурированное движение за значительно меньшее время, чем время выхода течения на стационарное состояние. Расчеты проведены с помощью явной разностной схемы, что позволило распараллелить процедуру вычислений.

Ключевые слова: тропический циклон, полная система уравнений Навье–Стокса, разностные методы

DOI: 10.56304/S2304487X21060134

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря проведенным в работах [1–7] исследованиям восходящих закрученных потоков (ВЗП), которые в природе встречаются в виде торнадо, тропических циклонов и огненных вихрей, создана газодинамическая теория этих потоков [7].

Описаны причины возникновения ВЗП как в природных условиях, так и при экспериментальных исследованиях [8, 9]. Установлены локальные и интегральные характеристики ВЗП с различными исходными геометрическими, газодинамическими и термодинамическими параметрами. При этом математически строго установлено, что причиной закрутки воздуха в природных ВЗП и единственным источником кинетической энергии вращательного движения воздуха в природ-

ных ВЗП является вращение Земли вокруг своей оси [1–7].

Также в работах [1–7] предложены конкретные рекомендации по практическому использованию полученных теоретических и экспериментальных результатов. Во-первых, обоснована возможность создания вихревого энергогенератора, в котором благодаря специально созданному воздушному потоку кинетическая энергия вращения Земли вокруг своей оси преобразуется в электрическую энергию. Во-вторых, указаны способы раннего обнаружения торнадо и его уничтожения [10]. А также описаны возможные действия по разрушению тропических циклонов при применении внешнего воздействия, имеющего разумные энергетические характеристики. Очевидно, что

практическое разрушение тропических циклонов невозможно без предварительного проведения соответствующих трехмерных нестационарных расчетов, которые должны адекватно моделировать течение в тропическом циклоне как до внешнего воздействия на него, так и после выбранного внешнего воздействия. В этих расчетах, естественно, необходимо учитывать геометрические, скоростные и термодинамические характеристики исходного потока в соответствии с данными натурных наблюдений, а также надежно определять энергетические затраты внешнего воздействия на циклон, которое приведет к его разрушению.

Первые результаты расчетов, удовлетворяющих упомянутым требованиям, представлены в данной работе.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

При численном построении сложных нестационарных и нестационарных течений газа для увеличения устойчивости счета часто применяют различные алгоритмы, сглаживающие решения. Для того, чтобы подобная процедура имела обоснованный физический смысл, в работе рассматривается полная система уравнений Навье—Стокса (ПСУНС) [11]. В ней учтены сжимаемость газа и диссипативные эффекты вязкости и теплопроводности так, что фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии выполняются точно. А также выполняются законы термодинамики, благодаря учету уравнений состояния.

ПСУНС в условиях действия сил тяжести и Кориолиса имеет в безразмерных переменных следующий вид [3–7]:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_t + u\rho_x + v\rho_y + w\rho_z + \rho(u_x + v_y + w_z) &= 0, \\ u_t + uu_x + vu_y + wu_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_x + \frac{1}{\gamma}T_x &= av - bw + \frac{\mu_0}{\rho}\left(u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} + \frac{3}{4}u_{zz} + \frac{1}{4}v_{xy} + \frac{1}{4}w_{xz}\right), \\ v_t + uv_x + vv_y + wv_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_y + \frac{1}{\gamma}T_y &= -au + \frac{\mu_0}{\rho}\left(\frac{1}{4}u_{xy} + \frac{3}{4}v_{xx} + v_{yy} + \frac{3}{4}v_{zz} + \frac{1}{4}w_{yz}\right), \\ w_t + uw_x + vw_y + ww_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_z + \frac{1}{\gamma}T_z &= bu - g + \frac{\mu_0}{\rho}\left(\frac{1}{4}u_{xz} + \frac{1}{4}v_{yz} + \frac{3}{4}w_{xx} + \frac{3}{4}w_{yy} + w_{zz}\right), \\ T_t + uT_x + vT_y + wT_z + (\gamma - 1)T(u_x + v_y + w_z) &= \frac{\kappa_0}{\rho}\Delta T + \frac{\mu_0\gamma(\gamma - 1)}{2\rho} \times \\ &\times \left\{ [(u_x - v_y)^2 + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2] + \frac{3}{2}[(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Здесь: ρ — плотность газа; u, v, w — проекции вектора скорости газа на декартовы оси; T — температура; $\gamma = 1.4$ — показатель политропы воздуха; $a = 2\Omega \sin \psi$; $b = 2\Omega \cos \psi$, ψ — широта точки, в которой находится начало прямоугольной системы координат, вращающейся вместе с Землей; $\Omega = 7.2722 \times 10^{-5}$ 1/с — модуль вектора угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси; μ_0, κ_0 — постоянные коэффициенты вязкости и теплопроводности, в работе положено $\mu_0 = 0.001$, $\kappa_0 = 1.46\mu_0$; $g = 9.8$ м/с² — постоянное ускорение свободного падения.

В системе (1) стандартным образом введены безразмерные переменные. При этом за масштабное значение скорости взята величина $u_{00} = \frac{1}{3} \times 10^3$ м/с, а за масштабное значение расстояния x_{00} в расчетах берется диаметр придонной части конкретного циклона (см., например, [12]). При этом масштабное значение времени t_{00} полагается равным $t_{00} = x_{00}/u_{00}$. Выбранное значение u_{00} близко к

значению скорости звука воздуха при стандартных условиях, т.е. при

$$\rho_{00} = 1.2928 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad T_{00} = 288 \text{ К} = 15^\circ\text{C}.$$

Константы ρ_{00} и T_{00} берутся за масштабные значения плотности и температуры.

Уравнения состояния в безразмерных переменных следующие:

$$p = \rho T, \quad e = T,$$

где p — давление, e — внутренняя энергия.

В системе (1) не учитывается выделение тепла в процессе конденсации влажного воздуха на определенной высоте при его подъеме вверх. Многие исследователи полагают (см., например, [13]), что выделение большого количества тепла разгоняет вверх поднимающийся воздух, тем самым увеличивая как общую кинетическую энергию циклона, так и кинетическую энергию окружающего движения воздуха в природном восходящем закрученном потоке. Однако отсутствует надежное научное обоснование факта перехода тепловой энергии в кинетическую энергию

окружного движения. Такого обоснования нет ни с помощью аналитических, или численных, или экспериментальных методов. А простые рассуждения показывают следующее. Пусть в какой-то вертикальной части потока выделилось какое-то количество тепловой энергии. В первую очередь это приведет к повышению температуры и, как обязательное следствие, к повышению давления. То есть изменятся только внутренние термодинамические характеристики потока газа. По закону Паскаля давление действует одинаково во все стороны. Следовательно, та часть давления, которая действует непосредственно вверх будет подталкивать движущийся вверх воздух, то есть будет увеличивать w — вертикальную составляющую вектора скорости газа. Но та часть давления, что будет действовать непосредственно вниз, будет тормозить воздух — уменьшать w в этой части потока. Та часть давления, что действует в горизонтальном направлении, будет раздвигать поток воздуха в разных горизонтальных направлениях от области нагрева. При этом будет изменяться только радиальная составляющая скорости воздуха. И никак не будет изменяться окружная скорость потока — это есть следствие законов механики. В монографии [7] приведен пример одного конкретного расчета трехмерного нестационарного потока. Этот расчет подтверждает отсутствие перехода дополнительной внешней тепловой энергии в механическую кинетическую энергию окружного движения в рассчитанном потоке.

Система (1) имеет смешанный тип: первое уравнение — уравнение неразрывности (дифференциальная форма закона сохранения массы) — образует гиперболическую часть системы, так как определяет в течениях сжимаемого теплопроводного вязкого газа возможность наличия слабого разрыва на контактной поверхности [11]; второе — пятое уравнения системы есть уравнения движения и энергии (дифференциальные формы законов сохранения импульса и энергии соответственно) и они составляют параболическую часть системы, так как содержат вторые производные компонент вектора скорости и температуры по пространственным переменным.

Для численного построения решений системы (1) используется разностная схема. А именно, для аппроксимации производной по временной переменной берутся значения функции с двух последовательных временных слоев:

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{f_{i,j,k}^{n+1} - f_{i,j,k}^n}{\Delta t}.$$

Здесь: верхний индекс есть номер временного слоя; i, j, k — номера узлов по переменным x, y, z соответственно. Для аппроксимации производных по пространственным переменным используются центральные разности значений функций

с предыдущего временного слоя. Расчет трехмерного нестационарного течения ведется по явной схеме переходом с очередного n -го временного слоя на следующий $(n+1)$ -й временной слой с постоянным заданным шагом Δt . При этом по пространственным переменным используется равномерная прямоугольная сетка с постоянными заданными шагами $\Delta x, \Delta y$ и Δz соответственно. Расчетная область (D) представляет собой прямоугольный параллелепипед, в основании которого находится квадрат с единичными сторонами: $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$. Высота параллелепипеда задается постоянной $z = z_0$ и, следовательно, $0 \leq z \leq z_0$. Конкретное значение константы z_0 выбирается разным для разных задач. Описанные параметры разностной схемы позволяют провести распараллеливание расчетов.

В качестве начальных условий при $t = 0$ берутся нулевые значения всех компонент вектора скорости и стационарные распределения плотности и температуры, соответствующие точному решению ПСУНС [3–7]. Граничные условия на боковых гранях расчетной области для плотности и температуры берутся из точного стационарного решения. Нормальная составляющая вектора скорости к конкретной грани определяется из “условия непрерывности”, а для двух других компонент вектора скорости — из “условия симметрии” [3–7]. Первое из условий означает линейную экстраполяцию значений функции на грань из внутренних точек области. Второе из указанных условий означает равенство нулю производной, выводимой с этой грани. Граничные условия на верхней и нижней гранях для всех газодинамических параметров также определяются из “условия непрерывности” или из “условия симметрии”.

Вначале при $0 \leq t \leq t_1$ рассчитывается образование ВЗП с помощью заданного центра плоскости $z = z_0$ вертикального продува со скоростью w_{00} и с последующим выходом потока на стационарное состояние при некотором $t = t_1$. В процессе счета при $0 \leq t \leq t_1$ у ВЗП определяются значения всех газодинамических параметров. А также рассчитываются изменения с течением времени значений кинетических энергий: $W, W_{r-}, W_{cir}, W_{z+}$ — всего потока; радиального движения воздуха к вертикальной части ВЗП; окружного движения воздуха; восходящего вертикального движения, в котором воздух идет только вверх. Рассчитанные стационарные распределения берутся за начальные условия в момент времени $t = t_1$ для последующего расчета потока после внесения в него в этот момент времени $t = t_1$ внешнего воздействия.

Численная методика позволяет моделировать различные внешние воздействия для прерывания

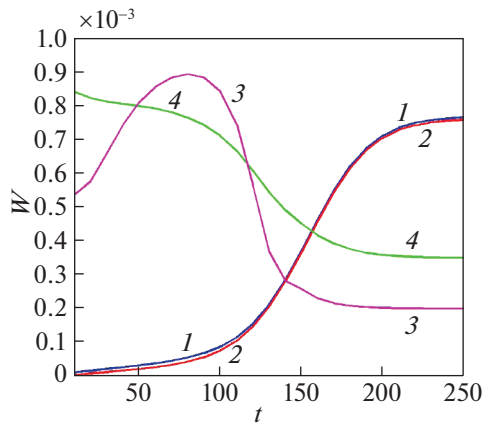


Рис. 1. Поведение с течением времени кинетических энергий потока: W , W_{cir} , $W_{r-} \times 10^2$, $W_{z+} \times 10^4$ — линии 1–4 соответственно.

вертикального движения воздуха в ВЗП. Например, увеличение температуры и (или) плотности на конкретные величины в заданных областях потока или соответствующие изменения компонент вектора скорости воздуха также в нужных местах и на выбранные величины. Для любого внешнего воздействия обязательно определяется величина энергии, внесенной в поток этим внешним воздействием.

Расчет возникшего при $t \geq t_1$ потока ведется с использованием все той же разностной схемы до того момента времени $t = t_2 > t_1$, после которого поток полностью разрушается, то есть когда движение воздуха становится полностью неструктурированным.

Это и будет означать то, что с помощью выбранного внешнего воздействия тропический циклон разрушен.

В процессе счета при $t_1 \leq t \leq t_2$ анализируется динамика возникшего потока в целом и в нужные моменты времени определяются локальные и интегральные характеристики этого нового потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты в данной работе велись на двух независимых компьютерах с обязательным сопоставлением полученных результатов во всех точках разностной сетки. Использовались две сетки: $101 \times 101 \times 11$ и $201 \times 201 \times 21$. Здесь первые два сомножителя есть число точек по осям Ox и Oy , третий сомножитель — по оси Oz . Согласие результатов расчетов по этим двум сеткам хорошее. Размеры разностных шагов, например, при большем числе точек брались $\Delta x = \Delta y = 0.005$, $\Delta z = 0.002$, $\Delta t = 0.00005$.

В данной работе представлены результаты расчета следующего варианта:

$x_{00} = 3.5 \times 10^5$ м — масштабное значение расстояния в данном расчете; расчетная область (D) следующая $350 \text{ км} \times 350 \text{ км} \times 14 \text{ км}$ в размерных величинах или $1 \times 1 \times 0.04$ в безразмерных величинах, то есть $z_0 = 0.04$;

$t_{00} = x_{00}/u_{00} = 1051.051$ с — масштабное значение времени, которое равняется примерно семнадцати с половиной минутам; безразмерному значению времени $t = 100$ соответствует двадцать девять часов и десять минут;

$\psi = \pi/6$ — широта местонахождения циклона, то есть местонахождения начала прямоугольной системы координат, вращающейся вместе с Землей;

$\gamma = 1.4$ — показатель политропы газа;

$w_{00} = 20$ м/с — скорость вертикального продува в представленном расчете.

В расчетах кроме значений газодинамических параметров ρ , u , v , w , T также определялись u_r , u_{cir} — радиальная и окружная составляющие вектора скорости газа [1–7].

Кинетическая энергия всего потока вычислялась по следующей формуле:

$$W = \frac{1}{2} \iiint_{(D)} \rho(u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz. \quad (2)$$

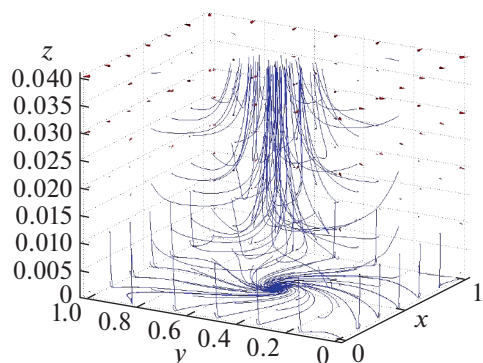
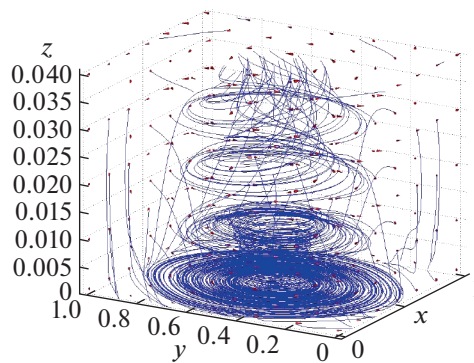
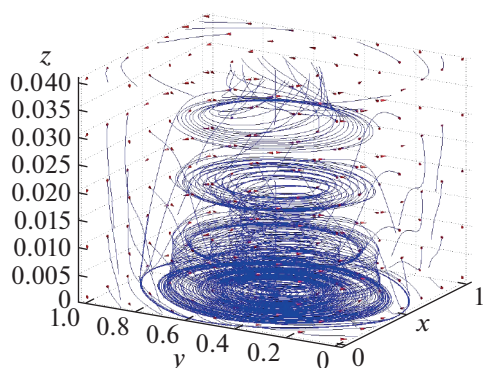
Значение этого тройного интеграла и соответствующих тройных интегралов, задающих значения W_{cir} , W_{r-} , W_{z+} — кинетических энергий окружного, радиального движения воздуха к вертикальной части ВЗП и восходящего вертикального движений, определяются численно. Формула (2) и соответствующие формулы для вычисления W , W_{cir} , W_{r-} и W_{z+} дают безразмерные значения этих величин. Размерное значение W_* кинетической энергии всего потока в рассматриваемом варианте дается равенством

$$W_* = W \times 2.4387 \times 10^{20} \text{ Дж.}$$

По аналогичным формулам рассчитываются размерные значения кинетических энергий разных составляющих движения воздуха в ВЗП.

В представленном расчете ВЗП вышел на стационарное состояние к моменту времени $t = t_1 = 250$, что соответствует значению размерного времени, равному 72 часам и 55 минутам, то есть чуть больше, чем трое суток.

На рис. 1 представлены изменения с течением времени кинетических энергий W , W_{cir} , $W_{r-} \times 10^2$, $W_{z+} \times 10^4$ — линии 1–4 соответственно. Здесь и

Рис. 2. Мгновенные линии тока в момент $t = 10$.Рис. 3. Мгновенные линии тока в момент $t = 150$.Рис. 4. Мгновенные линии тока в момент $t = 250$.

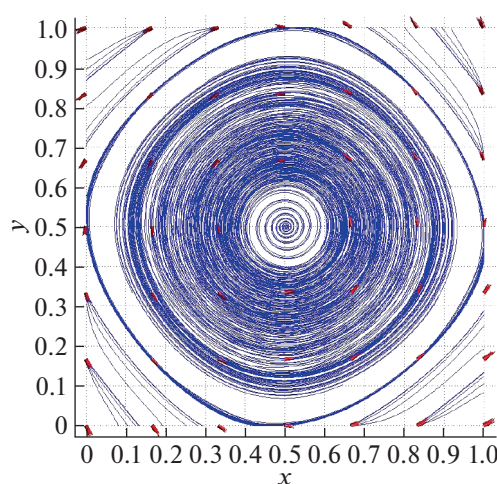
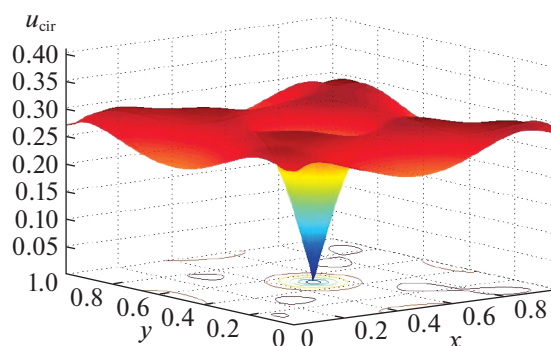
ниже на всех рисунках приведены числовые значения безразмерных величин.

Приведенные значения кинетических энергий говорят о том, что в окружном движении стационарного потока сосредоточено фактически девяносто три процента от общей кинетической энергии потока, а значения кинетической энергии вертикального движения фактически в тысячу раз меньше значения кинетической энергии всего потока.

На рис. 2–4 приведены мгновенные линии тока ВЗП в моменты времени $t = 10$, $t = 150$, $t = 250$, которые показывают процесс раскрутки воздуха в рассматриваемом ВЗП.

На рис. 5 приведены проекции мгновенных линий тока в момент $t = 250$ на плоскость xOy , что показывает наличие области ВЗП, обычно называемой “глазом циклона”.

Заметим, что в природе ВЗП перемещаются вдоль плоскости xOy [1–7]. В данном расчете ВЗП как бы “привязан” к месту вертикального продува и вдоль плоскости xOy практически не перемещается.

Рис. 5. Проекция мгновенных линий тока в момент $t = 250$ на плоскость xOy .Рис. 6. Окружная скорость u_{cir} в момент времени $t = 250$ при $z = 0.02$.

На рис. 6 приведена поверхность окружной скорости в момент времени $t = 250$ на высоте $z = 0.02$, то есть в середине вертикальной части ВЗП. Максимальное значение окружной скорости на этом рисунке порядка 83 м/с.

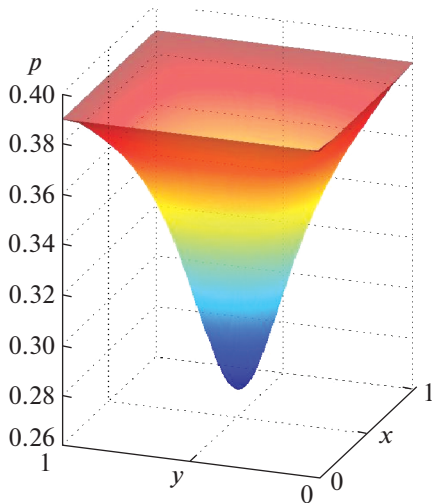


Рис. 7. Давление p в момент времени $t = 250$ при $z = 0.02$.

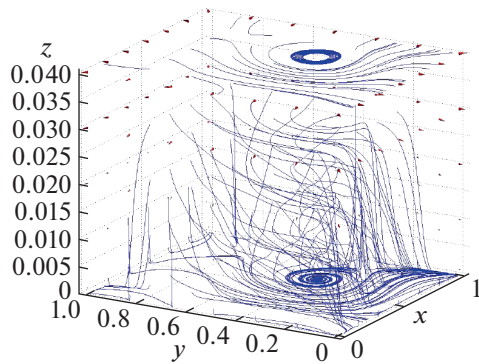


Рис. 9. Мгновенные линии тока в момент $t = 340$.

На рис. 7 приведено распределение давления в тот же момент времени и на той же высоте.

В момент времени $t = 250$ вертикальный продув был отключен и прекратились вертикальное и радиальное движение воздуха в ВЗП. С этого момента и начался процесс разрушения данного ВЗП. На рис. 8, 9 приведены мгновенные линии тока ВЗП в моменты $t = 290$ и $t = 340$. К моменту $t = 340$ структурированное движение воздуха в ВЗП фактически прекратилось и можно считать, что данный тропический циклон разрушился. Отметим, что после отключения вертикальной продувки ВЗП продолжает стоять на одном месте на плоскости xOy . Это отражает конкретное свойство соответствующих течений газа: если нет вертикального движения, то нет и движения вдоль плоскости xOy [1–7].

На рис. 10 представлено изменение кинетической энергии W всего потока при $t > 250$, кото-

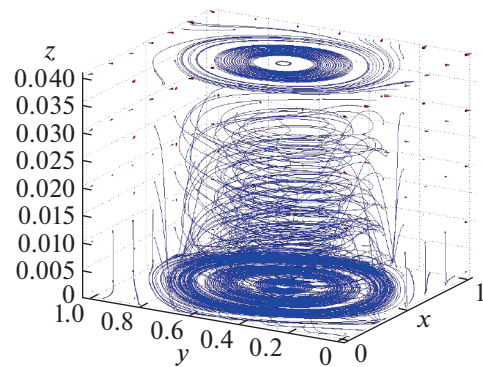


Рис. 8. Мгновенные линии тока в момент $t = 290$.

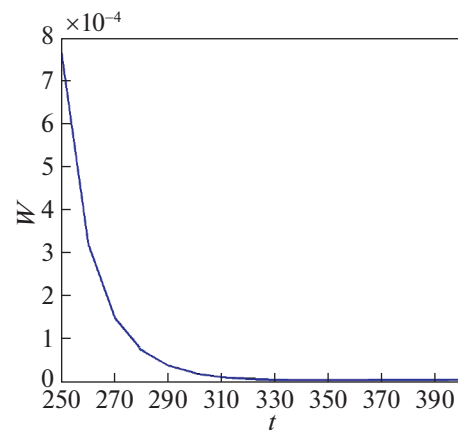


Рис. 10. Поведение кинетической энергии всего потока при $t > 250$.

рое также отражает “затухание” циклона фактически к моменту времени $t = 340$.

Таким образом, циклон “раскручивался” фактически три суток, а разрушился чуть более, чем за сутки. Это связано с тем, что при отсутствии радиального движения сила Кориолиса, действующая в Северном полушарии вправо от направления движения, раскручивает спиральное течение воздуха в ВЗП в другую сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численными расчетами подтверждено ранее сформулированное суждение, что при прекращении в ВЗП вертикального движения воздуха природа фактически сама останавливает и разрушает течение в тропическом циклоне. Рассчитанные значения кинетических энергий различных частей ВЗП говорят о том, что прекращение вертикального движения воздуха в ВЗП потребует энергии в сто–тысячу раз меньше, чем кинетическая энергия всего движущегося в тропическом циклоне воздуха. Это и определяет возможность

внешнего воздействия на циклон, которое позволит прекратить существование циклона и которое будет иметь разумные энергетические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 96 с.
2. Баутин С.П., Обухов А.Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
3. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г., Баутин К.В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: УрГУПС, 2013. 216 с.
4. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. Екатеринбург: УрГУПС, 2017. 336 с.
5. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. Екатеринбург: УрГУПС, 2019. 182 с.
6. Баутин С.П., Обухов А.Г. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 287 с.
7. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 399 с.
8. Баутин С.П., Макаров В.В. Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32). С. 39–45.
9. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Конейцев В.Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011. 312 с.
10. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Проблема предсказания и уничтожения смерча // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13. № 1 (47). С. 70–75.
11. Баутин С.П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009. 368 с.
12. Emanuel K.A. A statistical Analysis of Tropical Cyclone Intensity // Journal of the Atmospheric Sciences. 2000. V. 128. P. 1139–1152.
13. Нечаев А.М., Соловьев А.А., Соловьев Д.А. К вопросу о механизме образования тропического циклона // Процессы в геосредах. 2017. № 3 (12). С. 594–602.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 6, pp. 550–557

Numerical Simulation of the Destruction of a Tropical Cyclone by an External Force with Reasonable Energy Characteristics

S. P. Bautin^{a, #}, V. E. Zamyslov^{b, ##}, and A. G. Obukhov^{a, ###}

^a Snezhinsk State Physical-Technical Academy, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Chelyabinskaya oblast, 456776 Russia

^b Ural State Transport University, Yekaterinburg, 620034 Russia

^c Tyumen Industrial University, Tyumen, 625000 Russia

[#]e-mail: spbautin@mail.ru

^{##}e-mail: zamislov2017@yandex.ru

^{###}e-mail: agobukhov@inbox.ru

Abstract—A scheme was previously substantiated for the emergence and functioning of ascending swirling flows, which naturally occur in the form of tornadoes and tropical cyclones. It has been shown that the cause of natural twist of an upward air flow in these flows is the rotation of the Earth around its axis. It has also been mathematically proven that the kinetic energy of this rotational motion of air comes only from the kinetic energy of the rotation of the Earth around its axis. It has been established that when the upward motion of air in swirling flows stops, the rotation of the Earth will twist flow to the other side and destroy its rotational motion. Taking into account the previously obtained analytical results, the motion of air in such flows has been numerically simulated. Namely, three-dimensional unsteady calculations simulate flows in a tropical cyclone with gas-dynamic parameters of the flow and its linear dimensions corresponding to the natural observation data. The occurrence of a flow and its transition to a steady state in a specific time have been calculated. The calculations carried out using an explicit difference scheme, which made it possible to parallelize the calculation procedure, have revealed the destruction of a tropical cyclone after a given external energy impact on it and the transition of the air flow in it into unstructured motion in a much shorter time than the time required for the flow to reach a steady state.

Keywords: tropical cyclone, complete system of Navier–Stokes equations, difference methods

DOI: 10.1134/S2304487X21060134

REFERENCE

1. Bautin S.P. *Tornado i sila Koriolisa* [Tornado and the power of Coriolis]. Novosibirsk, Nauka, 2008. 96 p. (in Russian)
2. Bautin S.P., Obukhov A.G. *Matematicheskoe modelirovanie razrushytilnyh atmosferynh vihrey* [Mathematical modeling of destructive atmospheric vortices]. Novosibirsk, Nauka, 2012. 152 p. (in Russian)
3. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G., Bautin K.V. *Razrushytilnye atmosferynye vihri: teoremy, raschety, experimenty* [Destructive atmospheric vortices: theorems, calculations, experiments]. Novosibirsk, Nauka, Ekaterinburg, USURT, 2013. 216 p. (in Russian)
4. Bautin S.P., Derajbin S.L., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. *Razrushytilnye atmosferynye vihri i vrasenie Zemli vokrug svoei osi* [Destructive atmospheric vortices and the rotation of the Earth around its axis]. Ekaterinburg, USURT, 2017. 336 p. (in Russian)
5. Bautin S.P., Krutova I.Yu. *Analiticheskoe i chislennoe modelirovanie techenii gaza pri uchete deistviya sily Koriolisa* [Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the action of the Coriolis force]. Ekaterinburg, USURT, 2019. 182 p. (in Russian)
6. Bautin S.P., Obukhov A.G. *Chislennoe modelirovanie trehmernykh nestatsionarnykh techenii szymaemogo vajzko-go teploprovodnogo gaza* [Numerical simulation of three-dimensional unsteady flows of compressible viscous heat-conducting gas]. Ekaterinburg, USURT, 2020, 287 p. (in Russian)
7. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. *Gazodinamicheskaj teorija voshodjasih zakruchennykh potokov* [Gas-dynamic theory of ascending swirling flows]. Ekaterinburg, USURT, 2020, 399 p. (in Russian)
8. Bautin S.P., Makarov V.V. *Sozdanie potoka vozduha, zakrutytnogo siloi Koriolisa pri ispolzovanii truby dvuhmetrovoogo diametra* [Creating an air flow swirled by the Coriolis force when using a two-meter diameter pipe] *Vestnik USURT*, 2016, no. 4(32), pp. 39–45. (in Russian)
9. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeicev V.N. *Tornado* [Tornado]. Moscow, Fizmatlit, 2011, 312 p. (in Russian)
10. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. *Problema predskazaniy i unictozeniy smercha* [The problem of prediction and destruction of the tornado]. *Civil security technologies*, 2016, vol. 13, no. 1 (47), pp. 70–75. (in Russian)
11. Bautin S.P. *Characteristicheskaj zadacya Koshy i ee prilozeniy v gazovoi dinamike* [The characteristic Cauchy problem and its applications in gas dynamics]. Novosibirsk, Nauka, 2009. 368 p. (in Russian)
12. Emanuel K.A. *A statistical Analysis of Tropical Cyclone Intensity*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, vol. 128, pp. 1139–1152.
13. Nechaev A.M., Soloviev A.A., Soloviev D.A. *K voprosu o mehanizme obrazovaniy tropicheskogo cyklona* [On the question of the mechanism of formation of a tropical cyclone]. *Processes in geo-environments*, 2017, no. 3 (12), p. 594–602. (in Russian)