

ЗАГАДКИ ТОРНАДО БОЛЬШЕ НЕТ

С.П. Баутин

д.ф.-м.н., профессор, e-mail: spbautin@mail.ru

Снежинский Физико-Технический Институт Национального Исследовательского
Ядерного Университета «МИФИ», Снежинск, Россия

Аннотация. В статье приведены основные результаты газодинамической теории восходящих закрученных потоков, встречающихся в природе в виде торнадо и тропических циклонов. В том числе описана схема возникновения и устойчивого функционирования этих потоков. Обсуждается влияние тепловыделения, сопровождающее движения воздуха вверх в тропических циклонах. Дано объяснение одному визуальному эффекту, наблюдаемого у торнадо при его переходе в разрушительную стадию. Приведены основные теоретические, численные и экспериментальные результаты исследований восходящих закрученных потоков.

Ключевые слова: восходящий закрученный поток, торнадо, тропический циклон, сила Кориолиса, система уравнений газовой динамики..

Введение

В природе наблюдаются очень интересные движения воздушных масс: торнадо и тропические циклоны. Воздух в этих потоках одновременно с восходящим движением имеет ещё вращательное движение вокруг оси восходящего потока. Это вращательное движение обладает гигантской кинетической энергией, и вместе с нижней частью восходящего движения воздуха служит причиной многочисленных разрушений, приносимых торнадо и тропическими циклонами.

Торнадо и тропические циклоны исследуются автором с 2008 года. В этих исследованиях также принимали и принимают участие преподаватели и аспиранты трёх технических вузов: Уральского государственного университета путей сообщения (Екатеринбург), Снежинского физико-технического института НИЯУ МИФИ, Тюменского индустриального университета. В исследованиях, ведущихся этим научным коллективом, используются как теоретические методы (математическое аналитическое и численное моделирование соответствующих течений газа), так и экспериментальные. Результатами этих двенадцатилетних исследований стала газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [1], к которым относятся торнадо и тропические циклоны. Книга [1] доступна на сайте e-library.

Созданная теория позволила научнообоснованно ответить на два самых главных вопроса про эти потоки: откуда берётся закрутка воздуха в торнадо

и тропических циклонах и что является источником гигантской кинетической энергии вращательного движения воздуха в них. А именно, установлен новый естественнонаучный факт:

математически строго доказано, что закрутка воздуха в торнадо и тропических циклонах вызвана только вращением Земли вокруг своей оси и что источником кинетической энергии вращательного движения воздуха в торнадо и тропических циклонах является только кинетическая энергия вращения Земли вокруг своей оси.

Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков также позволила установить ряд принципиальных, ранее неизвестных, фактов, позволяющих глубже проникнуть в суть этих природных газовых течений.

Все полученные результаты согласуются как с данными натуральных наблюдений, так и с результатами экспериментов по созданию в лабораторных условиях свободных восходящих закрученных потоков.

И наконец, в результате исследований даны конкретные рекомендации по практическому использованию полученных знаний.

Схема возникновения и функционирования природных восходящих закрученных потоков

Начальное движение при возникновении природного восходящего закрученного потока, каким являются торнадо и тропические циклоны, есть вертикальное движение вверх тёплого воздуха (см. вертикальные стрелки на рис. 1, а), вызванное локальным прогревом солнечной энергией участка суши или водной поверхности, который на рис.1 выделен жирной линией. На смену восходящим объёмам воздуха поступают новые. Эти новые объёмы воздуха приходят в область восходящего потока снизу (см. рис. 1, б). Так начинает образовываться придонная часть восходящего потока.

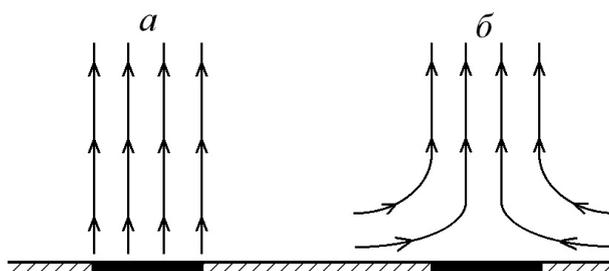


Рис. 1. Возникновение восходящего конвективного потока

Движение воздуха в придонной части вдоль поверхности Земли вначале имеет радиальный характер: от периферийных областей к основанию восходящего теплового потока со всех сторон (рис. 2. а). На рис. 2, а начальное радиальное движение в плоскости xOy изображено векторами скорости \mathbf{V} отдельных частиц газа, движущихся к общему центру, а заштрихованный круг обозначает область восходящего теплового потока.

Из-за вращения Земли вокруг своей оси на каждый движущийся объект действует соответствующая сила инерции, называемая силой Кориолиса по фамилии французского механика, который ввёл в рассмотрение эту силу.

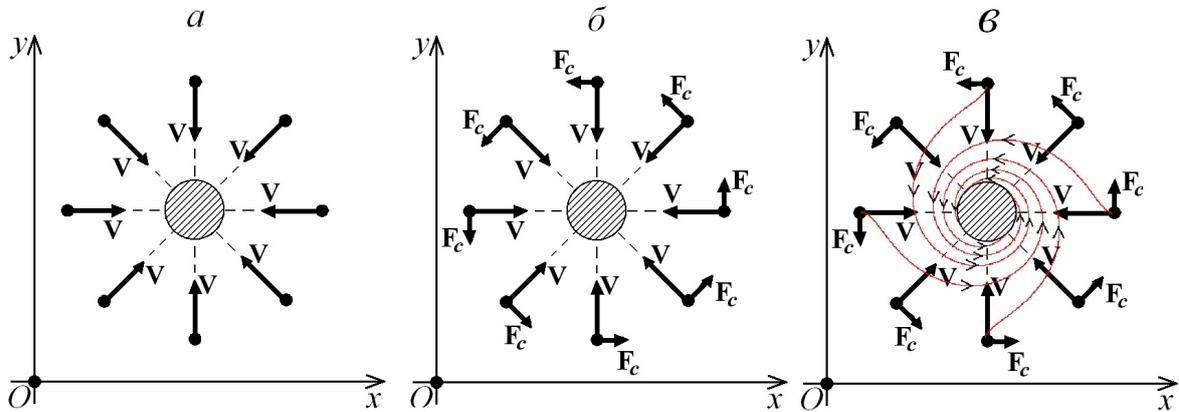


Рис. 2. Возникновение закрутки в радиальном потоке

Под действием F_c — силы Кориолиса — каждая частица в Северном полушарии отклоняется вправо от направления своего движения (рис. 2, б), и влево — в Южном полушарии. В результате этого в сплошной среде, движущейся к центру основания восходящего потока, возникает вращательное движение газа — закрутка газа: в Северном полушарии в положительном направлении, т. е. против хода часовой стрелки (спиральные линии на рис. 2, в), и в отрицательном направлении (по ходу часовой стрелки) в Южном полушарии.

Факт возникновения закрутки в придонной части и её направление обоснованы с помощью доказательства математических теорем о существовании соответствующих решений системы уравнений газовой динамики при учёте действия силы Кориолиса и следуют из строго установленных свойств этих решений. Начальная стадия формирования восходящего закрученного потока и его закрутка в соответствующем направлении подтверждены также экспериментами и натурными наблюдениями, сделанными в США.

Естественно, что закрутка воздуха после этого будет передаваться и в вертикальную часть потока (см. рис. 3).

Если восходящий поток и, следовательно, движение воздуха к его основанию будут сохраняться долго, то вращение Земли через действие силы Кориолиса закрутит воздух в придонной части рассматриваемого потока до большой скорости, что и придаст такому потоку разрушительную силу.

А само восходящее закрученное движение при этом выйдет на самоподдерживающийся режим.

Поступление энергии на самоподдерживающееся движение воздушных масс в восходящем закрученном потоке происходит следующим образом:

- 1) вращение Земли закручивает в придонной части газ, движущийся к основанию восходящего потока (рис. 2, в);
- 2) закрутка газа передаётся в вертикальную часть (рис. 3);

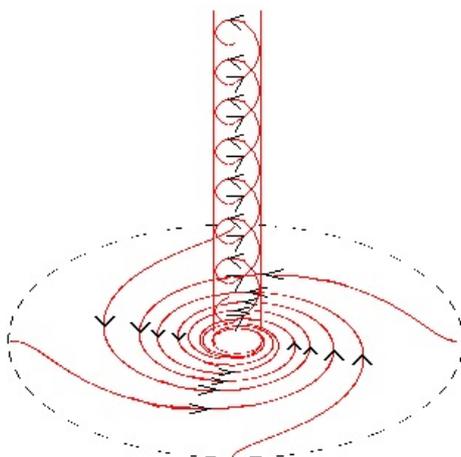


Рис. 3. Переход закрутки в вертикальную часть потока

3) центробежная сила создаёт в вертикальной части потока как бы «трубу с тягой»: возникает область пониженного давления в окрестности оси потока (рис. 4), а на границе между восходящим потоком и внешним покоящимся воздухом создаёт эффект непроницаемых стенок (см. на рис. 5 заштрихованные вертикальные прямоугольники), поскольку давление воздуха на границе вертикальной части восходящего потока совпадает с давлением внешнего покоящегося воздуха на этой границе, и воздух эту границу не пересекает;

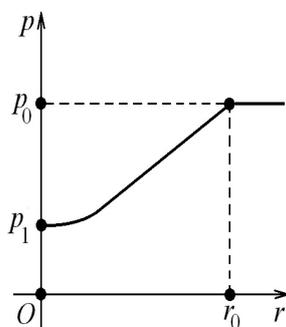


Рис. 4. Распределение давления в вертикальном потоке

4) снизу в «трубу с тягой», имеющей в центре пониженное давление, вдавливается под действием силы тяжести внешний по отношению к восходящему закрученному потоку воздух (рис. 5).

На рис. 5 буквой g обозначено ускорение свободного падения, а буквой p — давление. Индексы 0 и 1 относятся соответственно к внешнему и внутреннему давлению; буквы h, z, H отмечают придонную, среднюю и верхнюю части восходящего закрученного потока соответственно, и при этом $p_0(h) > p_1(h)$.

Из приведённой схемы течения газа в восходящем закрученном потоке следует, что закрутка воздуха в придонной части восходящего закрученного потока имеет принципиальное значение для всего течения в восходящем закру-

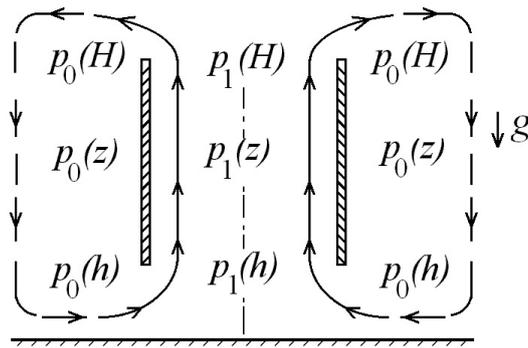


Рис. 5. Схема движения воздуха и значения давлений по высоте

ченном потоке, а также для возникновения и существования самоподдерживающегося режима движения в этом потоке.

Для возникновения торнадо или тропического циклона принципиальным является наличие большой ровной поверхности. Но когда восходящий закрученный поток переходит в самоподдерживающуюся стадию функционирования, тогда незначительные неровности на подстилающей поверхности практически не влияют на поток. А вот когда на пути придонной части встречаются серьёзные препятствия: строения, лес и тому подобное — тогда придонная часть, воздействуя и разрушая эти препятствия, теряет кинетическую энергию закрученной части своего потока. Из-за уменьшения (или даже уничтожения) закрутки происходит разрушение «стенок трубы», устойчивость течения в вертикальной части также уменьшается, и внешний, невращающийся воздух, останавливает весь вихрь. В итоге закрутка воздуха разрушается внешним воздействием и этот природный поток прекращает своё существование. Способ принудительного прекращения движения воздуха в восходящем закрученном потоке с помощью разрушения «стенок трубы» запатентован.

Влияние тепловыделения, сопровождающего конденсацию влажного воздуха, на течение в тропическом циклоне

По вопросу об источнике энергии в тропических циклонах давно сложилось и утвердилось мнение, что таким источником является тепловыделение. Оно на определённой высоте сопровождается конденсацией влаги, присутствующую в воздухе, который поднимается вверх в циклоне. Исследователи полагают, что выделение большого количества тепла разгоняет вверх поднимающийся воздух, тем самым как бы увеличивая и общую кинетическую энергию циклона, и, главное, кинетическую энергию окружного движения воздуха в природном восходящем закрученном потоке. А именно, в этом окружном движении и сосредоточена основная часть кинетической энергии циклона.

Последнее предложение, конечно же, верное.

Однако для всего другого вышесказанного отсутствует надёжное научное обоснование факта перехода тепловой энергии в кинетическую энергию окруж-

ного движения. В настоящее время такого научного обоснования нет — ни аналитическими, ни численными, ни экспериментальными методами.

А использование общих законов механики приводит к следующему.

Пусть в какой-то вертикальной части потока выделилось какое-то количество тепловой энергии.

В первую очередь это приведёт к повышению температуры от T_1 до T_2 и, как обязательное следствие, к повышению давления от p_1 до p_2 (см. рис. 6).

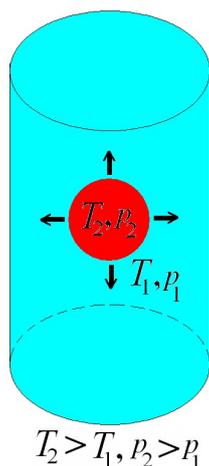


Рис. 6. Схема выделения тепла при конденсации влаги

По закону Паскаля давление действует одинаково во все стороны.

Следовательно, та часть возросшего давления, которая действует непосредственно вверх, будет подталкивать движущийся вверх воздух, то есть увеличит w — вертикальную составляющую вектора скорости газа. Но та часть возросшего давления, что действует непосредственно вниз, будет тормозить воздух — уменьшать w в этой части потока.

Та часть возросшего давления, что действует в горизонтальном направлении, будет раздвигать поток воздуха в разных горизонтальных направлениях от области нагрева, изменяя радиальную составляющую скорости воздуха.

Следовательно, при движении воздуха от области нагрева будут изменяться только вертикальная и радиальная составляющие его скорости. И никак не будет изменяться окружная скорость потока — это есть следствие законов механики.

Поэтому дать надёжный ответ на вопрос: «Как тепловыделение скажет-ся непосредственно на скоростных характеристиках потока?» — можно будет только по результатам надёжных экспериментов либо по результатам надёжных расчётов трёхмерных нестационарных течений при использовании адекватных математических моделей. В книге [1] приведён пример одного конкретного расчёта трёхмерного нестационарного восходящего закрученного потока при внесении в него дополнительного тепловыделения. Результат этого расчёта подтверждает отсутствие перехода добавленной в поток тепловой энергии

в механическую кинетическую энергию окружного движения в рассчитанном потоке.

Об одном визуальном эффекте у торнадо

Процессу самоподдерживающегося устойчивого функционирования разрушительного атмосферного вихря предшествует одно важное явление, наблюдающееся у торнадо.

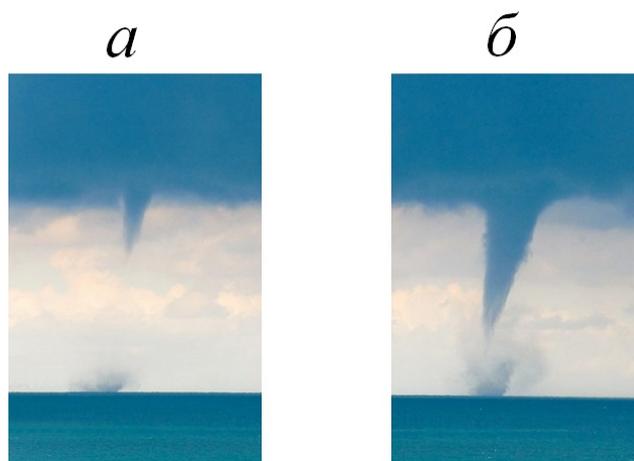


Рис. 7. Возникновение и развитие воронки в верхней части потока возле облака

В самой верхней части восходящего потока — обычно возле границы с облаком, в которое «упирается» восходящий поток, — возникает вращающаяся воронка. С течением времени она начинает расти вниз.

На рис. 7 приведены фотографии торнадо с такой возникающей (рис. 7, а) и начинающей расти вниз (рис. 7, б) воронкой.

Этот визуальный эффект с очень многими исследователями сыграл злую шутку. Они полагают, что торнадо возникает из облака, которое по каким-то причинам начинает закручивать воздух, и он при этом начинает движение сверху вниз. А когда указанная воронка, как полагают эти исследователи, — само торнадо, — достигает подстилающей поверхности, вот только тогда воздух в торнадо начинает движение снизу вверх.

Однако видимые на обеих фотографиях (см. рис. 7) под воронками облака у горизонтальной подстилающей поверхности говорят о том, что здесь внизу уже присутствует вращение воздуха, хотя визуально это вращение фиксируется пока не по всей своей высоте. Закрутка воздуха в торнадо выбрасывает из его нижней части попавшие туда примеси (пыль, влагу, предметы и т. п.), что и наблюдается как облака под воронками.

На рис. 8 приведена фотография ещё одного торнадо, у которого вертикальная часть присутствует во всю видимую высоту — от подстилающей поверхности до облака. Но вертикальная часть закручена ещё слабо и визуально фиксируется только благодаря сильной запылённости и боковой подсветке Солнцем.

А в верхней части торнадо под самым облаком только начала формироваться опускающаяся вниз воронка. В тот момент времени, когда воронка достигает поверхности Земли и вся вертикальная часть торнадо становится видимой, в неё начинает активно всасываться воздух. Именно в этот момент и зарождается разрушительная сила торнадо.



Рис. 8. Фотография торнадо с возникающей воронкой

Дадим объяснение этому явлению на основе схемы возникновения восходящего потока и его перехода к устойчивому функционированию.

При этом обращаем внимание на тот факт, что возникновение опускающейся воронки наблюдается на краю облака, в которое упирается торнадо. Представляется, что это получается тогда, когда на восходящий закрученный поток надвигается облако. Схематично это изображено на рис. 9.

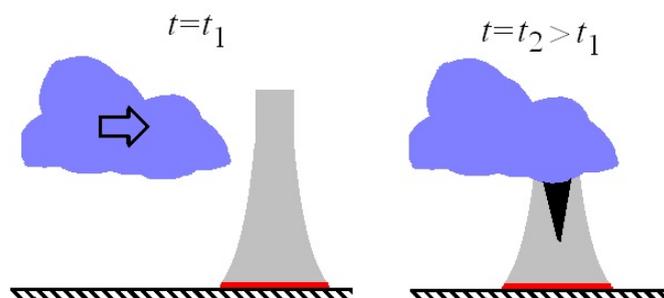


Рис. 9. Схема возникновения воронки при набегании облака на торнадо

А на рис. 10 этот факт проиллюстрирован соответствующей фотографией.

Пусть вертикальную часть восходящего закрученного потока пересекает облако, которое играет роль непроницаемой поверхности и вдоль которой растекается воздух, покидающий восходящий закрученный поток через его верхний край. Пусть также восходящий поток ещё поддерживается за счёт нагрева нижних объёмов воздуха, но уже сформировалась придонная часть с большой закруткой. Эта закрутка в достаточных масштабах передаётся в вертикальную часть восходящего закрученного потока (см. рис. 11, *з*).

Спрашивается, в какой части восходящего потока в результате имеющейся закрутки газа начнёт проявляться эффект «трубы с тягой, имеющей непроницаемые стенки»? Возможный ответ: скорее всего там, где в вертикальной части



Рис. 10. Фотография конкретных торнадо с воронками

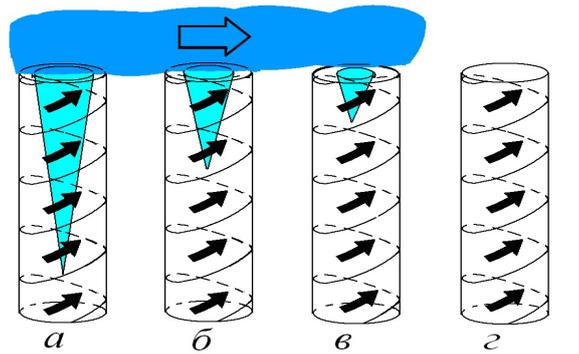


Рис. 11. Схема возникновения и развития воронки

восходящего закрученного потока меньше всего значение h_s — шага винтового движения газа.

А значение h_s меньше всего там, где меньше всего w — вертикальная составляющая скорости газа, т. е. в самой верхней части восходящего закрученного потока, где восходящий поток тормозится больше всего: во-первых, в результате действия силы земного притяжения на частицы газа, прошедшие всю вертикальную часть восходящего закрученного потока, т. е. поднявшиеся выше всех. А во-вторых, именно здесь восходящий поток тормозится об облако. К тому же в самой верхней части восходящего потока наименьшее значение по всей вертикальной части имеет $p_0(z)$ — давление внешнего воздуха, что также способствует формированию «непроницаемых стенок», благодаря имеющейся закрутке в вертикальной части восходящего закрученного потока.

Итак, первое возникновение «трубы с тягой, имеющей непроницаемые стенки», происходит в самой высокой точке вертикальной части потока, на ко-

торый надвинулся край облака. Эта ситуация сопровождается одновременным понижением давления возле оси восходящего потока. Оба эти действия воспринимаются наблюдателем как возникновение под облаком вращающейся и распространяющейся вниз воронки (см. рис 11, в). Но основной поток воздуха с самого начала своего функционирования всё время является восходящим.

Благодаря приходу снизу новых объёмов воздуха, имеющих ещё большую закрутку, «непроницаемые стенки» начинают прирастать и, следовательно, увеличивать свои вертикальные размеры за счёт удлинения нижней части. Визуально это воспринимается как движение воздуха в воронке вниз, а на самом деле это просто добавление снизу новых участков «непроницаемых стенок». Такой рост вниз «непроницаемых стенок», естественно, сопровождается образованием на том же уровне (движущемся вниз) области пониженного давления в окрестности оси потока.

Вся эта динамика воспринимается как удлинение вниз вращающейся воронки (см. рис 11, б, а).

Наконец, наступает момент, когда прирастающие снизу (за счёт прихода новых объёмов воздуха со все бóльшей закруткой) «непроницаемые стенки» достигают придонной части восходящего закрученного потока, т. е. вращающаяся воронка почти касается поверхности Земли.

Именно тогда область пониженного давления достигает придонной части и за счёт возникновения бóльшего перепада давления (разность $[p_0(h) - p_1(h)]$ резко увеличивается) происходит активное поступление воздуха из придонной части в вертикальную. И именно тогда полностью проявляется эффект «трубы с тягой» и начинается разрушительное действие воздуха, вращающегося в придонной части потока.

Таким образом, образование вверху восходящего потока вращающейся воронки и её последующее опускание вниз как раз и является достаточно быстро протекающей стадией перехода от начального функционирования восходящего закрученного потока за счёт тепловой энергии к функционированию этого потока за счёт энергии вращения Земли, вкладываемой в закрутку придонной части через действие силы Кориолиса.

Представляется, что подобный переход от одной к другой стадии функционирования восходящего закрученного потока имеют место и у восходящих закрученных потоков, линейные размеры которых больше, чем у типичных торнадо. И возникновение в верхней части таких потоков области пониженного давления — «глаза циклона» — связано не с наличием облака на пути восходящего закрученного потока, как это изображено на рис. 9–11, а связано это с тем, что верхняя, уже достаточно закрученная часть восходящего потока просто достигла высот, где малы давление и температура воздуха, окружающего восходящий поток.

Немного математики и физики

Любое движение сплошной среды, которым является и воздух, подчиняется фундаментальным законам физики: законам сохранения массы, импульса

и энергии. Эти законы можно выписывать в разных формах, одна из которых есть математическая система уравнений с частными производными, называемая системой уравнений газовой динамики (1):

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

В системе (1) независимые переменные: t — время; r, φ — полярные координаты в плоскости переменных x, y ; z — вертикальная координата в прямоугольной системе координат $xOyz$. Начало этой прямоугольной системы координат $xOyz$ находится на поверхности Земли в некоторой точке O с широтой ψ , и эта система координат вращается вместе с Землёй (рис. 12).

Искомые функции в системе (1) следующие: $c = \rho^{(\gamma-1)/2}$ — скорость звука газа, являющаяся степенью плотности газа ρ , где $\gamma = \text{const} = 1.4$; u, v, w — радиальная, окружная и вертикальная составляющие вектора скорости газа соответственно. Значения констант $a = 2\Omega \sin \psi$ и $b = 2\Omega \cos \psi$ зависят от Ω — модуля вектора Ω угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси (рис. 12).

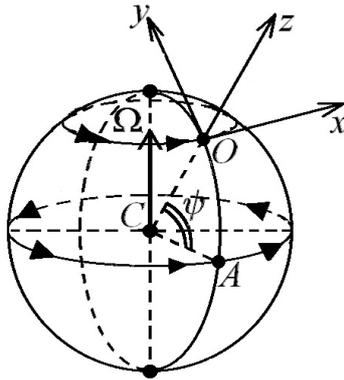


Рис. 12. Ортогональная система координат, вращающаяся вместе с Землёй

Все независимые и зависимые переменные в системе (1) стандартными для математики и физики способами сделаны безразмерными.

Учитывая вид системы (1), обсудим один, достаточно часто приводимый, факт. Его предъявляют для того, чтобы отрицать влияние на торнадо и тропические циклоны силы Кориолиса, то есть отрицать влияние вращения Земли

вокруг своей оси на эти потоки: «Сила Кориолиса перпендикулярна скорости движения частиц газа и поэтому она работы не совершает». Этот факт, конечно, истинный. Но его предъявляют те, кто не знает вида системы (1) — системы уравнений газовой динамики при учёте вращения Земли вокруг своей оси. В систему (1) слагаемые, учитывающие вращение Земли вокруг своей оси, входят в правые части уравнений движения — в последние три уравнения системы (1), являющиеся дифференциальной формой закона сохранения импульса. Наличие этих слагаемых обеспечивает придание из вне дополнительного ускорения движущимся частицам газа. Тем самым обеспечивается изменение значений компонент вектора скорости газа, включая изменение окружной компоненты. И, следовательно, из-за этого изменяется кинетическая энергия всего движущегося газа, в том числе кинетическая энергия вращательного движения воздуха в рассматриваемых потоках.

Да, сила Кориолиса работу не совершает.

Сила Кориолиса сообщает частицам газа дополнительное ускорение.

И её учёт обеспечивает изменение скорости газа и, как следствие, изменение кинетической энергии потока за счёт внешней причины — за счёт кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.

Некоторые результаты исследований торнадо и тропических циклонов

Теоретические исследования свойств течений воздуха в торнадо и тропических циклонах состоят в построении решений системы (1) и в анализе свойств полученных решений. А кроме этого — в сопоставлении свойств найденных решений с результатами натуральных наблюдений за природными торнадо и тропическими циклонами, а также с результатами соответствующих физических экспериментов.

Математическое моделирование течения воздуха при начале радиального движения к восходящему потоку (см. рис 2, а) привело к соответствующей задаче для системы (1). Доказано [1], что получившаяся в этом случае математическая задача имеет решение, причём единственное. Если в этом решении положить $\Omega = 0$, то есть если не учитывать вращение Земли вокруг своей оси, то в единственном решении окружная скорость будет тождественно равна нулю и никакой закрутки воздуха не будет. Но если в этом единственном решении положить $\Omega \neq 0$, то в течении воздуха сразу возникает закрутка: $v \neq 0$. Дальнейшее исследование этого решения показало, что если $\sin \psi > 0$, то $v > 0$. А если $\sin \psi < 0$, то $v < 0$. Другими словами: если течение воздуха рассматривать в Северном полушарии, где $\sin \psi > 0$, то имеющая место закрутка воздуха идёт в положительном направлении, то есть против хода часовой стрелки. А если рассматривать движение воздуха в Южном полушарии, то есть когда $\sin \psi < 0$, то движение воздуха идёт в отрицательном направлении — по ходу часовой стрелки.

Таким образом, в задаче о начале радиального движения воздуха к восходящему потоку строго математически доказано: при учёте вращения Земли вокруг

своей оси возникает закрутка воздуха и однозначно определяется направление закрутки в зависимости от того, в каком полушарии Земли рассматривается поток; при неучёте вращения Земли вокруг своей оси закрутка воздуха не возникает.

Также проделано математическое моделирование течения воздуха при его радиальном внешнем притоке в сформировавшийся восходящий закрученный поток. Такая ситуация возникает, например, при исследовании течения в функционирующем тропическом циклоне (см. фотографию на рис. 13).

В этом случае для системы (1) ставится другая конкретная задача. Для построенного единственного решения этой задачи также строго математически доказано: если $\Omega = 0$, то в исследуемом течении закрутки воздуха нет; если $\Omega \neq 0$, то $v \neq 0$ и имеет место закрутка воздуха, направление которой точно такое же, как в предыдущей задаче о начале радиального движения к восходящему потоку.



Рис. 13. Фотография тропического циклона из космоса

Исследование других свойств решений второй задачи для системы уравнений газовой динамики позволило сопоставить их с данными натурных наблюдений за торнадо разной интенсивности, собранными в так называемой шкале Фудзиты.

Таблица 1. Классы торнадо

1	2	3	4	5	6	7	8
Класс торнадо, циклон	r_0 , м	$V_F(r_0)$, м/с шкала	$V(r_0)$, м/с расчет	r_{in} , м	$t_{стац.}$, час	W , Дж	W_v/W
$F0$	2,5	19,0	19,01	975	3,1	$5,099 \cdot 10^5$	0,497
$F1$	8,0	33,0	32,97	2618	4,6	$1,452 \cdot 10^7$	0,876
$F2$	25,5	51,0	51,02	5949	6,8	$3,248 \cdot 10^8$	0,973
$F3$	80,5	71,0	70,96	12522	8,3	$5,693 \cdot 10^9$	0,994
$F4$	273,5	93,0	93,01	26500	13,3	$1,000 \cdot 10^{11}$	0,9986
$F5$	804,5	117,0	116,98	50890	13,6	$1,212 \cdot 10^{12}$	0,9996
Циклон	36500	52,9	53,0	175100	27,4	$6,158 \cdot 10^{12}$	0,99997

В приведённой таблице столбцы имеют следующие смыслы: в 1 столбце даны обозначения торнадо разной интенсивности; во 2 столбце r_0 — половина ширины полосы разрушений, производимых этим торнадо, которая полагается радиусом стока воздуха в вертикальную часть; в 3 столбце $V_F(r_0)$ — наблюдаемое максимальное значение ветра для торнадо разной интенсивности.

Столбцы 2, 3 в таблице заполнены данными натуральных наблюдений из шкалы Фудзиты. Столбцы 4–8 заполнены с использованием установленных свойств построенных решений второй задачи.

В 4 столбце $V(r_0)$ — рассчитанная скорость восходящего закрученного потока при $r = r_0$. Сравнение значений из столбцов 3 и 4 говорит о том, что результаты расчётов хорошо совпали с данными натуральных наблюдений.

В 5 столбце r_{in} — рассчитанное значение радиуса притока воздуха в торнадо, оно задаёт размеры области, с которой собирается воздух в конкретный поток. До этих исследований данные значения были неизвестны.

В 6 столбце $t_{стац.}$ — рассчитанное время, за которое соответствующее течение воздуха выходит на стационарный режим, что тоже ранее было неизвестно.

В 7 и 8 столбцах приведены рассчитанные данные энергетических характеристик потоков, W — значение кинетической энергии всего течения, W_v — кинетическая энергия окружного движения, а W_v/W — их отношение. Данные натуральных наблюдений и проведённые расчёты показывают, что торнадо становятся разрушительными только тогда, когда кинетическая энергия, вкладываемая вращением Земли в окружное движение природного потока, составляет половину или больше всей кинетической энергии восходящего закрученного потока. И чем большую интенсивность имеют такие потоки, тем больше кинетической энергии вращательного движения берётся из кинетической энергии

вращения Земли вокруг своей оси.

Последняя строка в таблице 1 составлена по средним данным натуральных наблюдений за тропическими циклонами (r_0 — радиус «глаза» циклона) и по результатам расчётов соответствующих решений второй задачи для системы уравнений газовой динамики.

Одним из эффективных инструментов исследований восходящих закрученных потоков стали отработанные численные методы расчётов трёхмерных нестационарных потоков воздуха.

Часть расчётов проведена при локальном нагреве подстилающей поверхности. Тогда в начальные моменты времени в окрестности области нагрева возникают течения в разных направлениях: в горизонтальном направлении движения от области нагрева и в вертикальном направлении движения от этой области. С течением времени второе направление движения становится доминирующим.

Если при численном моделировании этих течений не учитывалось вращение Земли вокруг своей оси, то есть полагалось $\Omega = 0$, то в итоге возникало только конвективное движение воздуха вверх. На рис. 14 приведены мгновенные линии тока такого течения.

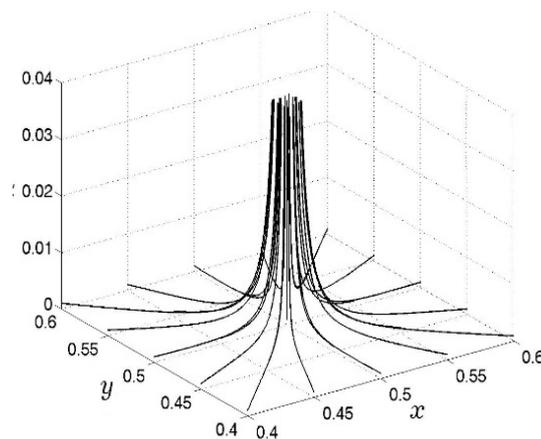


Рис. 14. Мгновенные линии тока конвективного потока при $\Omega = 0$

Но если в этих расчётах полагалось $\Omega \neq 0$, то есть если учитывалось вращение Земли вокруг своей оси, то в начальные моменты времени возникало течение с двумя закрутками в разные стороны. Горизонтальное движение от области нагрева порождало возникновение закрутки в отрицательном направлении (по ходу часовой стрелки). А частичное движение объёмов воздуха вверх приводило к радиальному движению к центру области нагрева замещающих их объёмов воздуха, в результате чего в потоке возникала закрутка в положительном направлении (против хода часовой стрелки). На рис. 15 приведён вид сверху на мгновенные линии тока возникшего сложного движения воздуха.

Как уже отмечалось выше, с течением времени движение воздуха вверх от области локального нагрева становится доминирующим и доминирующей становится закрутка в положительном направлении (см. рис. 16), причём в центре теплового вихря появляется расширяющаяся свободная от линий тока

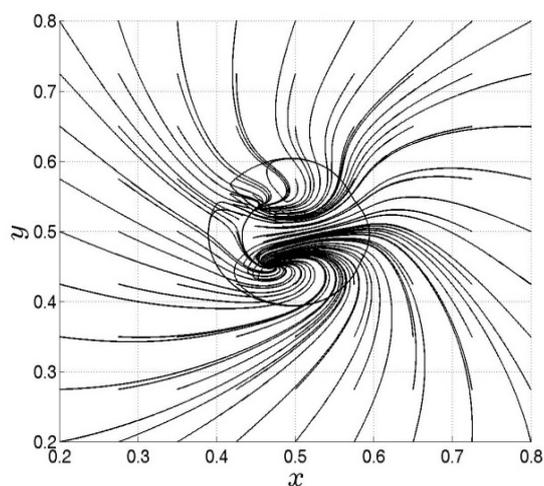


Рис. 15. Проекция мгновенных линий тока в начальные моменты времени при $\Omega \neq 0$

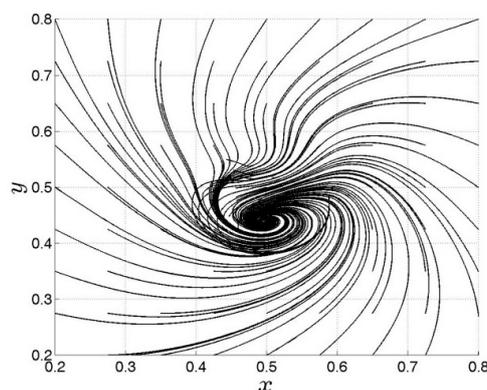


Рис. 16. Формирование с ростом времени закрутки потока при $\Omega \neq 0$

область — «глаз» циклона (рис. 17). И в целом, с возрастанием времени движение воздуха оформляется как восходящий закрученный в соответствующую сторону поток (рис. 18).

Кроме теоретических исследований были проведены и экспериментальные исследования потоков, возникающих при вертикальном продуве воздуха вверх по трубе. На рис. 19 приведена фотография установки, называемой трубой и являющейся вертикальной шестигранной призмой, с длиной каждой горизонтальной грани в один метр и общей высотой три метра. Два верхних венца трубы полностью закрыты оргстеклом. Верхняя часть нижнего венца также закрыта оргстеклом, а между нижним его краем и подстилающей поверхностью имеется зазор высотой 0,5 метра. Верх трубы закрыт металлической крышкой, имеющей посередине круговое отверстие, в котором расположены электродвигатель и вентилятор. При включении электродвигателя лопасти вентилятора вращаются в отрицательном направлении, то есть по ходу часовой стрелки, и прогоняют воздух снизу вверх с вертикальной скоростью 7,5–10,0 м/с. При

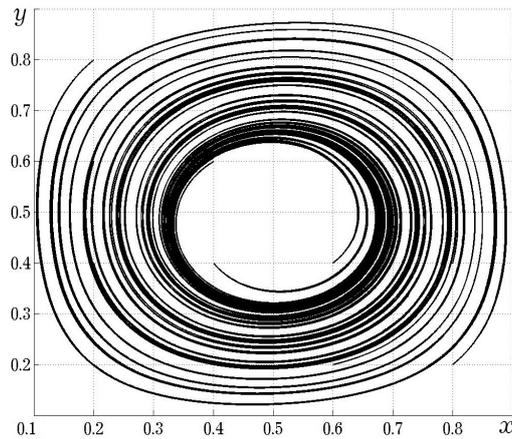
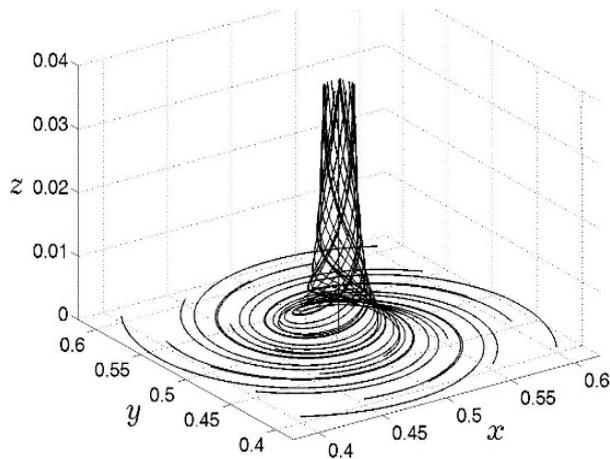


Рис. 17. Возникновение области «глаз циклона»

Рис. 18. Мгновенные линии тока восходящего закрученного потока при $\Omega \neq 0$

этом на подстилающей поверхности на границе трубы фиксировалась положительная окружная скорость в пределах 0,6–1,7 м/с, то есть имела место закрутка газа в положительном направлении — против хода часовой стрелки. Что является прямым следствием вращения Земли вокруг своей оси.

Возможное практическое применение результатов теории

Полученные теоретические и экспериментальные результаты говорят о возможности создания вихревого энергогенератора, получающего электрическую энергию из вращения Земли вокруг своей оси. Представляется, что создание трубы, осуществляющей продув воздуха вертикально вверх, позволит при определённых геометрических размерах и при конкретных скоростях продува воздуха получить на подстилающей поверхности вокруг трубы окружное движение воздуха с кинетической энергией бóльшей, чем величина работы, затрачиваемой на вертикальный продув воздуха. В таблице 2 приведены результаты рас-



Рис. 19. Экспериментальная установка для продува воздуха вертикально вверх

чётов скоростных и энергетических характеристик потока при диаметре трубы в 5 метров и различных скоростях продува.

Таблица 2. Скоростные и энергетические характеристики потока

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

Здесь W , W_v — кинетические энергии всего потока и окружающего движения воздуха в потоке.

По результатам расчётов чётко определяется скорость продува воздуха по трубе, при которой вращение Земли вокруг своей оси вкладывает в поток воздуха достаточное количество кинетической энергии. И тогда после создания соответствующей установки останется только технически реализовать какой-либо конкретный способ преобразования кинетической энергии вращательного движения воздуха в электрическую энергию.

Создание установок с вертикальным продувом и получением в них самоподдерживающегося движения в восходящем закрученном потоке позволит создавать энергетически эффективные вентиляционные установки для борьбы со смогом в мегаполисах. Вопрос борьбы с городским смогом очень актуален для Китая.

Также актуальным представляется вопрос проветривания и открытых горных карьеров.

Реализация установок подобного действия с вертикальным продувом воздуха также позволит перемещать влажный воздух вверх для образования облаков и для последующего вызывания дождя над заданной территорией. Естественно, что это предложение в свою очередь может быть интересным для Арабских Эмиратов и для других стран с подобным климатом.

И, наконец, с использованием результатов теоретических исследований высказаны рекомендации по обнаружению торнадо на ранней стадии и по возможным способам уничтожения и торнадо, и тропических циклонов, в том числе на стадии их разрушительных действий [2]. Вызывает даже некоторое удивление то, что США, серьёзно страдающие от разрушительных действий торнадо, до сих пор не воспользовались уже опубликованными рекомендациями для реальной борьбы с торнадо.

А чтобы предложить конкретные рекомендации по уничтожению с разумными энергетическими затратами восходящих закрученных потоков типа тропический циклон, необходимо проведение очень большого количества соответствующих расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. 400 с. URL: <https://elibrary.ru/download/elibrary\44007063\18309457.pdf> (дата обращения: 25.06.2021).
2. 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.

THE TORNADO PUZZLE IS NO MORE

S.P. Bautin

Professor, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, e-mail: spbautin@mail.ru

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University
MEPhI, Snezhinsk, Russia

Abstract. The article presents the main results of the gas-dynamic theory of ascending swirling flows occurring in nature in the form of tornadoes and tropical cyclones. In particular, the scheme of the emergence and stable functioning of these flows is described. The influence of heat release accompanying the upward movement of air in tropical cyclones is discussed. An explanation is given for one visual effect observed in a tornado during its transition to the destructive stage. The main theoretical, numerical and experimental results of studies of ascending swirling flows are presented.

Keywords: ascending swirling flow, tornado, tropical cyclone, Coriolis force, system of gas dynamics equations..

REFERENCES

1. Bautin S.P., Krutova I.Yu., and Obukhov A.G. Gazodinamicheskaya teoriya voskhodyashchikh zakruchennykh potokov. Ekaterinburg, UrGUPC Publ., 2020, 400 p. URL: <https://elibrary.ru/download/elibrary\44007063\18309457.pdf> (25.06.2021). (in Russian)
2. Bautin S.P., Krutova I.Yu., and Obukhov A.G. Problema predskazaniya i unichtozheniya smercha. Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti, 2016, vol. 13, no. 1(47), pp. 70–75. (in Russian)

Дата поступления в редакцию: 26.06.2021