

## Торнадо – автоколебательная система в активной среде, генерирующая вогнутые спиральные автоволны и атмосферные вихри

М.Е. Мазуров

Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова  
[mazurov37@mail.ru](mailto:mazurov37@mail.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Смерч, который называют также торнадо, - природное явление огромной разрушительной силы - таинственное и загадочное. Обычно считают, что торнадо – атмосферное явление - вихрь образуется во время грозы, [1-3].

### КЛАССИФИКАЦИЯ ТОРНАДО

Естественной представляется классификация по субстрату, из которого состоит торнадо. По субстрату вихря можно выделить следующие типы торнадо: 1) атмосферные – воздушные; 2) электрические; 3) огненные; 4) пылевые; 5) жидкостные – водяные; 6) снежные и другие. Различные по субстрату торнадо показаны на рис. 1.

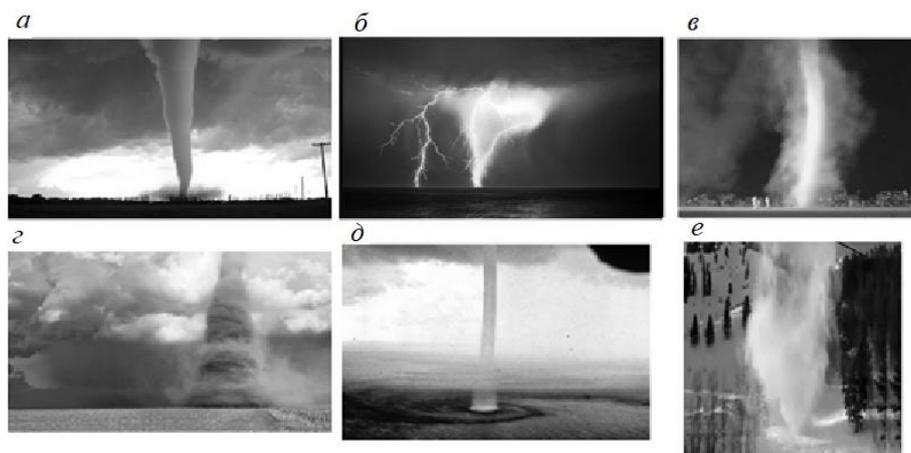


Рис. 1. Торнадо различные по субстрату: а) атмосферные – воздушные; б) электрические; в) огненные; г) пылевые; д) жидкостные – водяные; е) снежные.

Возможна классификация атмосферных торнадо по форме: 1) бичеподобные, тонкие; 2) колоннообразные; 3) бочкообразные, лохматые; 4) составные, когда около одной воронки торнадо вращаются ещё несколько дополнительных, Торнадо можно создавать искусственно. Поэтому искусственные торнадо будем считать специфическим классом, который более подробно рассмотрим в дальнейшем. Этот класс позволяет наглядно представить механизм возникновения и свойства торнадо.

### ИЗВЕСТНЫЕ ТЕОРИИ ТОРНАДО

Перечислим некоторые известные теории торнадо. 1). Теория самоорганизации. 2). Теория возмущенных участков атмосферы, в которых градиенты электрического поля достигают критических значений; 3). Теория разделения электрических зарядов. Установлено, что возникновение торнадо находится в прямой зависимости от развития значительных по мощности грозовых процессов; 4). Теория возникновения множества внутренних молний. Обсуждение молниеобразования и его возможная связь с торнадообразованием; 5). Теория мезомасштабной турбулентности. [3]. Получена 3D визуализация топологически эквивалентная одной из форм торнадо. 6). Газодинамическая структура смерча В.С. Политова [4]. Имеется ряд работ по исследованию закрученных вихрей и их приложений.

### МОДЕЛЬ ТОРНАДО КАК САМООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрим следующее определение торнадо. Определение. Торнадо – структура, возникающая в неоднородной активной среде, в которой возбужденные автоколебательные вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию, возбуждают вихри, уходящие в окружающую среду. Можно сказать, что атмосферное торнадо – автоколебательная система в активной среде грозового облака, генерирующая периодические вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию (ВСАПЭ) и создающие крупномасштабные атмосферные вихри. Структурная схема торнадо согласно предлагаемой модели показана на рис. 2.

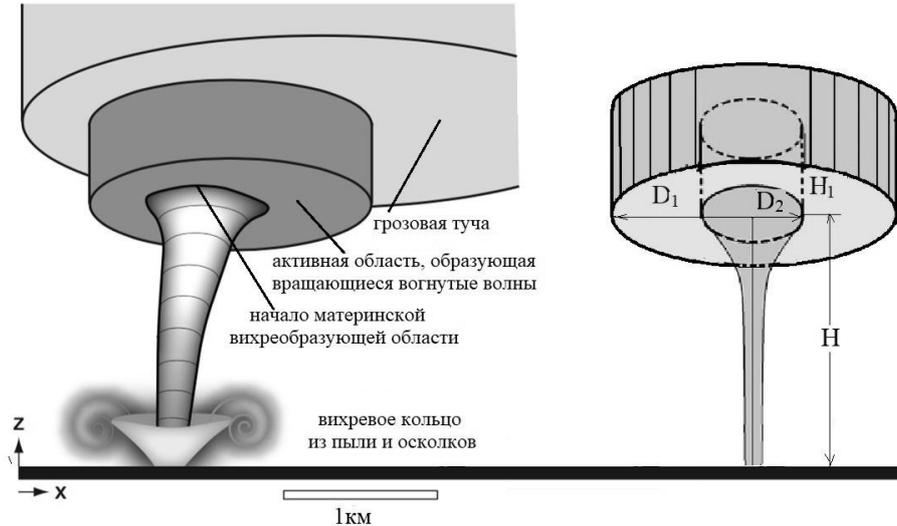


Рис. 2. Структурная схема торнадо. Вид на торнадо и грозовое облако снизу. Справа на схематической структуре  $D_1$  - диаметр активной среды,  $D_2$ ,  $H_1$  - диаметр и высота материнской области, где образуется вихрь,  $H$  - высота от земли до грозового облака.

Согласно определению структуры торнадо, приведенному выше, специфические свойства торнадо определяются активной средой – грозовым облаком и субстратом создаваемого вихря.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОРНАДО

Для описания активной среды принято использовать системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = F_i(E_1, \dots, E_n) + D_i \Delta E_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad (1)$$

где  $E_i$  - переменные,  $F_i$  - нелинейные функции,  $D_i$  - коэффициенты диффузии,  $\Delta E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$ . В качестве модели активной среды в вычислительном эксперименте были использованы уравнения Фитцхью-Нагумо [5].

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 - \frac{x_1^3}{3} - x_2 + I + D_1 \Delta x_1; \quad \frac{dx_2}{dt} = \varepsilon(a - x_1 + b x_2) + D_2 \Delta x_2 \quad (2)$$

где  $I$  - ток смещения,  $a, b, \varepsilon$  - параметры:  $a = 0.7, b = 0.8, I = 0.142$ ,  $D_1, D_2$  - коэффициенты диффузии.

Вихревая воронка торнадо в математической модели торнадо создается за счет ВСАПЭ, которые возбуждают вихревые движения воздуха и образование воронки торнадо. Для математического описания образования вихревой воронки торнадо в дальнейшем используем уравнения Навье – Стокса. В векторном виде для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом [6]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nu \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

где  $\mathbf{v} = (v^1, \dots, v^n)$  - векторное поле скоростей,  $p$  - давление,  $\nabla$  - оператор Гамильтона,  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,  $\rho$  - плотность,  $\mathbf{f}$  - векторное поле массовых сил. В систему уравнений Навье - Стокса добавлены краевые и начальные условия

$$\mathbf{v}|_{\partial\Omega} = 0, \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0.$$

Расчет вихревых решений уравнений Навье – Стокса производится в круговой области, которой аппроксимируется материнская область вихря. При численном моделировании производится сшивание решений в активной среде и на границе круговой области.

Начальные условия для возникновения круговых автоволн в активной среде обсуждались в работе [7], посвященной их возникновению в предсердиях человека. Начальные условия для возникновения круговых автоволн имеют много общего для активных сред различных типов.

#### ВОГНУТЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ АВТОВОЛНЫ, ПЕРЕНОСЯЩИЕ ЭНЕРГИЮ

Образование вогнутой спиральной автоволны, переносящей энергию, в неоднородной двумерной области описано в работах [8,9]. Для конкретной реализации ВСАПЭ была использована неоднородная круговая область, разбитая на кольца. В качестве активной среды для генерации ВСАПЭ была использована система из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, а именно уравнения ФитцХью-Нагумо. Параметры уравнения (2) в каждом кольце подбирались таким образом, чтобы обеспечить необходимую для образования вогнутой автоволны скорость распространения в каждом кольце. Приводим результаты вычислительного эксперимента по созданию вогнутой волны с помощью уравнений ФитцХью-Нагумо (2). Вогнутая автоволна показана на рис. 3.

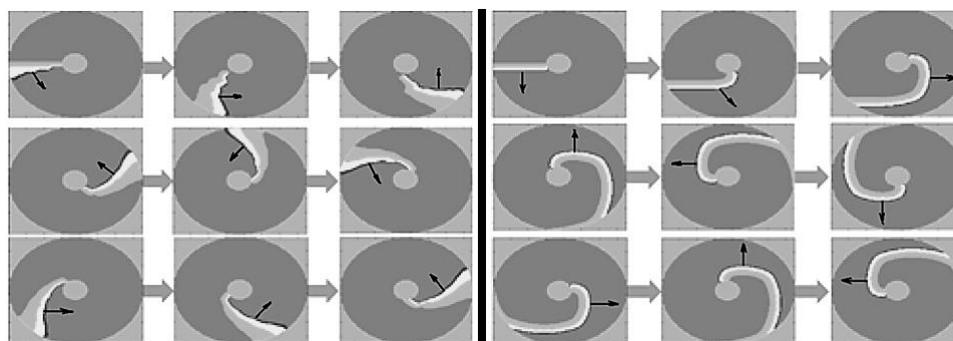


Рис. 3. Вогнутая автоволна в модели ФитцХью – Нагумо показана слева. Для сравнения выпуклая автоволна, в однородной круговой области, распространяющаяся из центра области, показана справа.

Если считать периферическую область ядром вогнутой спиральной автоволны, переносящей энергию, то вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию, можно рассматривать как внутриядерные волны.

### СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ВИХРЬ

Сжатие вихря к оси обусловлено воздействием вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию (ВСАПЭ), стремящихся уплотнить вогнутые волны к центру автоколебательной активной материальной среды облака. Ввиду возникновения неустойчивости рождается вихревое движение, выбрасываемое вертикально вниз к поверхности земли. Торнадо - это часть грозового облака, которая имеет быстрое вращение вокруг вертикальной оси за счет образования ВСАПЭ. Сначала вращение видно только в самом облаке, затем часть его отвисает вниз в виде воронки, которая постепенно удлиняется и, наконец, соединяется с землей.

### КОНСТРУИРОВАНИЕ СМЕРЧА – ТОРНАДО НА ОСНОВЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ

Понимание механизмов функционирования предлагаемой модели позволяет создавать торнадо по заданному плану, из заданных элементов структуры. В качестве активной среды - материнской субстанции могут использоваться вращающиеся механические системы: диски, круги с лопатками, механически закрученные воздушные потоки. Известно моделирование и исследование огненных торнадо.

Торнадо может быть сконструирован в стакане с водой, молоком, кофе с помощью закручивания поверхностного слоя жидкости, что приводит к образованию воронки торнадо. В зависимости от скорости вращения можно получить торнадо с различной длиной воронки. Чем выше скорость вращения, тем длиннее воронка, что иллюстрируется рис. 4.



Рис. 4. Образование торнадо в воде при использовании вместо активной среды закрутки поверхностного слоя пластинкой с лопастями. Наибольшая скорость вращения на рис. 4 справа, наименьшая – слева.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Д.В. Наливкин “Ураганы, бури, смерчи”. М.: Наука, 1969. 487 с.
2. А.Ю. Вараксин, М.Э. Ромаш, В.Н. Копейцев “Торнадо”. М.: Физматлит. 2011.
3. С.А. Арсеньев, А.Ю. Губарь, В.Н. Николаевский//ДАН, 2004. т.396, № 4, С.541-546.
4. В.С. Политов. // Челябинск, Миасс, КБМ им. академика Макеева В.П., 1992. С. 259-270.
5. R.A. FitzHugh // Biophys. J. 1961. V. 1 P. 445
6. Р. Темам “Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд.” М.: Мир, 1981.
7. М.Е. Мазуров, И.М. Калюжный // Вестник МГУ. Серия: Физика, Астрономия. 2014. № 3. С. 45-49.
8. М.Е. Мазуров. // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. том 82. № 1. С. 72–77.
9. М.Е. Мазуров // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. том 82. № 1. С. 83-87.