

03

## Ветроэнергетический метод предотвращения развития тропического циклона

© В.И. Каганов

Московский государственный институт радиотехники,  
электроники и автоматики  
E-mail: mirea@mirea.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2005 г.

Предлагается грубая модель тропического циклона в форме пространственной автоколебательной системы спирального типа. Дается оценка кинетической энергии циклона и возможный метод предотвращения его развития путем „впрыскивания“ в воздушный поток энергии ветровых электроэнергетических установок и преобразования вращательного квазиламинарного движения воздушной массы в квазитурбулентное. Приводятся результаты лабораторного эксперимента. Дается количественная оценка параметров системы.

PACS: 47.32.cf

**Грубая модель тропического циклона.** Согласно метеорологической науке, тропический циклон представляет собой атмосферную систему с низким давлением и с воздушными потоками, закрученными в спираль со скоростью ветра более 17 m/s [1,2]. Теплое ядро циклона формируется над тропической акваторией океана температурой 26–27°C. Прогретый воздух, насыщенный влагой, поднимаясь с поверхности океана на большую высоту, охлаждается, вследствие чего водяные пары конденсируются, выделяя тепло, питающее эрэнгией зарождающийся циклон. При возникновении подобного лавинообразного процесса на широте 5–20°C в Северном полушарии под воздействием земной силы Кориолиса образуется крупномасштабный циклонический вихрь, вращающийся вокруг квазивертикальной оси против часовой стрелки и окруженный массой относительно холодного и неподвижного воздуха. Развитие циклона продолжается до момента равновесия между тепловой энергией испарения и охлаждением океана в силу перемешивания его вод.

Оценим кинетическую энергию циклона как вращающегося столба воздушного потока высотой  $L$  и радиусом  $R$  при плотности воздуха  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ . Воспользовавшись известной из физики формулой, получим:

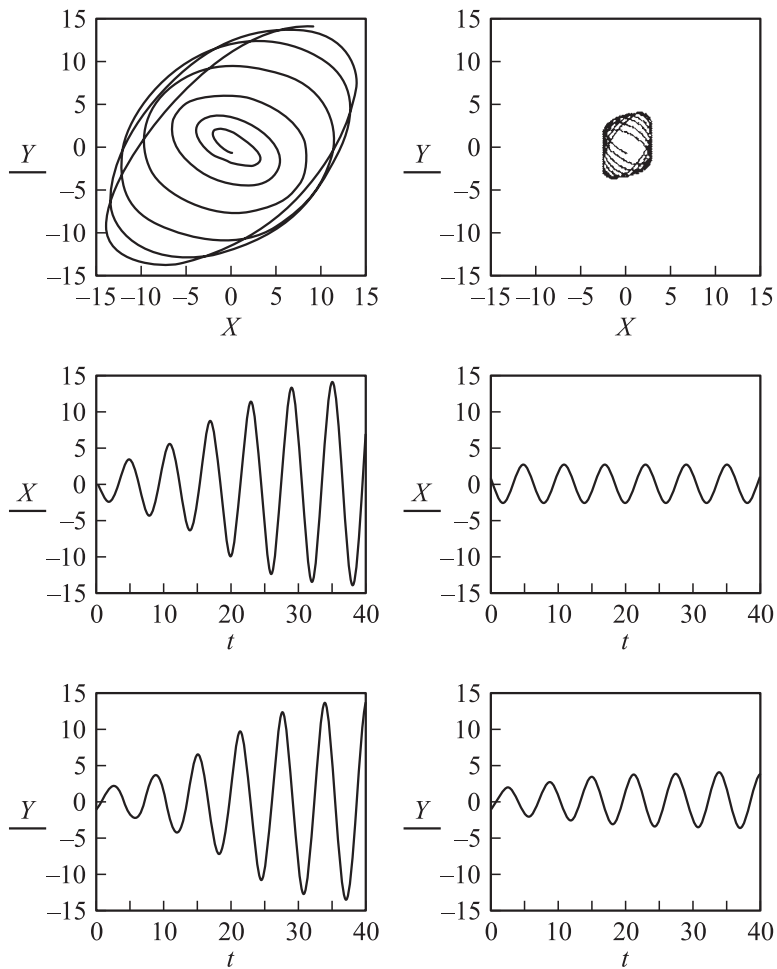
$$W_c = 0.25 \pi \rho L R^2 V^2 \approx L R^2 V^2 \text{ [J]}, \quad R \text{ [m]}, \quad L \text{ [m]}, \quad V \text{ [m/s]}. \quad (1)$$

Согласно (1), при  $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $L = 10 \text{ km}$  и  $R = 1 \text{ km}$  кинетическая энергия циклона  $W_c = 10^{12} \text{ J}$ ; при  $V = 30 \text{ m/s}$ ,  $R = 10 \text{ km}$  —  $W_c = 10^{15} \text{ J}$ ; при  $R = 100 \text{ km}$  —  $W_c = 10^{17} \text{ J}$ . Для сравнения укажем, что энергия, выделяемая при взрыве атомной бомбы в тротиловом эквиваленте  $20 \text{ kt}$ , составляет  $10^{14} \text{ J}$ , а водородной в  $20 \text{ Mt}$  —  $10^{17} \text{ J}$ . Из приведенных цифр видно, какой разрушительной силой обладает тропический циклон даже при небольшом радиусе всего в  $10 \text{ km}$  в случае высокой скорости вращения.

С позиции теории колебаний циклон — спиральное образование вокруг вертикальной оси — можно трактовать как объемный автоколебательный процесс, стремящийся к предельному циклу: состоянию равновесия между энергией, питающей циклон (тепловая энергия испарения), и суммарной энергией всех потерь (охлаждение за счет океана, трение с поверхностью, преодоление препятствий и т.д.). Такой процесс на плоскости  $Ox-Oy$  формально можно описать с помощью двух модифицированных нелинейных дифференциальных уравнений Ван-дер-Поля, определяющих работу автогенератора [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} - a_1(1 - a_2x^2) \exp(-\alpha t) \frac{dx}{dt} + \Omega x &= 0, \\ \frac{d^2y}{dt^2} - a_3(1 - a_4y^2) \exp(-\beta t) \frac{dy}{dt} + y &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В соответствии с принятыми в гидроаэродинамике допущениями уравнения (2) отражают динамический процесс для каждой из частиц исследуемой среды. Решить систему уравнений (2) можно численным способом. Программа подобного решения с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка в математической среде Mathcad приведена в [3]. Графики, полученные в результате расчета по программе при отсутствии внешнего воздействия на систему (коэффициенты  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ) и значениях коэффициентов  $a_1 = 0.2$ ,  $a_2 = 0.5$ ,  $a_3 = 0.2$ ,  $a_4 = 0.02$ ,



**Рис. 1.** Графики движения частицы при грубой модели циклона: левые при  $\alpha = 0, \beta = 0$ ; правые при  $\alpha = 0.3, \beta = 0.1$ .

$\Omega = 1.08$  приведены на рис. 1 (левый столбец). На графиках четко просматривается спиралеобразный характер развития процесса, напоминающий по форме тропический циклон.

Анализ уравнений (2) показывает, что остановить развитие автоколебательного процесса в системе можно путем постепенного внесения в нее дополнительных потерь, что можно осуществить, приняв значения коэффициентов  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$ . Графики для такого случая, полученные в результате расчета по программе при коэффициентах  $\alpha = 0.3$  и  $\beta = 0.1$ , приведены справа на рис. 1.

**Ветроэнергетический способ внесения затухания в исследуемый процесс.** Уравнения (2) дают общий рецепт по ограничению развития автоколебательного процесса в системе путем внесения в нее потерь, но, естественно, не отвечают на вопрос, как практически это можно осуществить. Рассмотрим в этой связи работу ветроэнергетической установки. При анализе работы ветрового электрогенератора следует рассматривать три вида энергии в процессе ее преобразования и соответственно три вида мощности: кинетическую энергию в единицу времени воздушного потока, прогоняемого через площадь  $S = \pi r^2$ , где  $r$  — радиус пропеллера, со скоростью  $V$ ; механическую энергию вращающегося пропеллера и электрическую энергию ветрового электрогенератора, что позволяет получить следующую формулу для мощности последнего [4]:

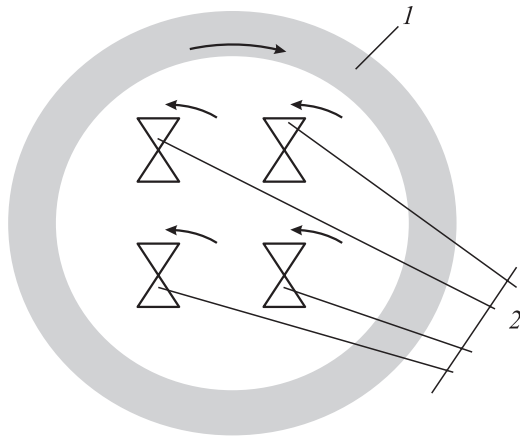
$$P_w \approx 0.78 r^2 V^3 \text{ [W]}, \quad r \text{ [m]}, \quad V \text{ [m/s]}. \quad (3)$$

Запитаем полученной электрической энергией электродвигатель, на оси которого закрепим пропеллер. Работа, совершаемая таким вентилятором, с учетом КПД электродвигателя за время  $T_w$  составит:

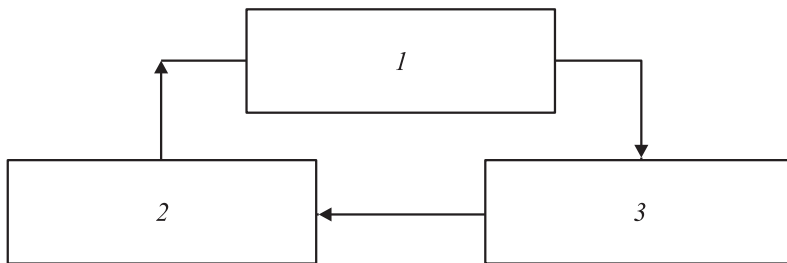
$$W_w \approx 0.5 r^2 V^3 T_w \text{ [J]}, \quad r \text{ [m]}, \quad V \text{ [m/s]}, \quad T_w \text{ [s]}. \quad (4)$$

При  $r = 32 \text{ m}$ ,  $V = 30 \text{ m/s}$  из (4) получим:  $W_w \approx 10^7 T_w \text{ J}$ .

Разместим группу подобных ветровых генераторов-вентиляторов в зоне действия циклона (рис. 2). Направление вращения пропеллеров вентиляторов установим по часовой стрелке, т.е. противоположным направлению вращения вихревого воздушного потока (циклоны в Северном полушарии всегда вращаются против часовой стрелки), что должно способствовать торможению развития циклона. Таким образом, в рассматриваемой модели часть кинетической энергии циклона сначала преобразуется в электрическую энергию группы ветровых электрогенераторов, которая затем превращается в энергию, „впрыскиваемую“ с помощью вентиляторов в форме локальных направленных воздушных



**Рис. 2.** Условная схема размещения ветровых генераторов-вентиляторов в зоне действия циклона: 1 — основной воздушный поток; 2 — локальные воздушные потоки.



**Рис. 3.** Структурная схема энергетической системы с отрицательной обратной связью: 1 — кинетическая энергия циклона  $W_c$ ; 2 — преобразование электрической энергии в энергию воздушных потоков  $W_w$ ; 3 — преобразование части кинетической энергии циклона в электрическую.

потоков в основной, „материнский“ поток в противоположном от него направлении и потому тормозящих развитие последнего. Такая энергетическая система с отрицательной обратной связью по энергии может быть представлена в виде структурной схемы, приведенной на

рис. 3. В первую очередь два параметра оценивают работу данной системы: отношение „организованной“ энергии  $W_w$ , вбрасываемой в основной воздушный поток вентиляторами, к кинетической энергии „материнского“ потока  $W_c$ . Назовем данное отношение энергетическим коэффициентом обратной связи  $\gamma = W_w/W_c$ . Второй параметр характеризует инерционные свойства системы, связанные с временем поднятия прогретого воздуха насыщенного влагой с поверхности океана до момента конденсации водяных паров и выделения ими тепла, питающего энергией циклон. При вертикальной скорости поднятия воздуха  $V < 1 \text{ m/s}$  [1] и высоте в 10 km, на которой происходит конденсация паров, получим для данного времени  $T_v > 10\,000 \text{ s}$ . За время  $T_v$  вентиляторы должны „впрыснуть“ в циклон такое количество „организованной“ энергии, которое должно начать тормозить его развитие. Параметры  $\gamma$  и  $T_v$  определяют значения коэффициентов  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$  в уравнении (2).

Таков в общих чертах физический механизм возможного предотвращения развития тропического циклона на начальном этапе, когда его разрастание можно остановить с помощью группы ветровых генераторов-вентиляторов. Последние можно разместить на специальных высокоскоростных кораблях, управляемых по радио и направляемых в зону зарождения циклонического образования после его обнаружения с помощью метеорологических спутников.

**Лабораторный эксперимент.** На дне цилиндрического сосуда диаметром 25 см и высотой 25 см был размещен вентилятор, создающий вихревой воздушный поток против часовой стрелки (имитация циклона) в  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ . Над этим вентилятором были размещены четыре маленьких вентилятора, вращающиеся по часовой стрелке, с суммарной мощностью ветровых потоков около  $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$  (рис. 2). При включении только большого вентилятора в сосуде образовывался циклический поток воздуха ламинарного типа. При одновременном включении всех пяти вентиляторов ламинарный поток преобразовывался в квазитурбулентный. Таким образом, проведенный лабораторный эксперимент подтвердил идею возможного торможения мощного вихревого циклического процесса с помощью других специально организованных потоков, закрученных в противоположную сторону. Согласно эксперименту, значение коэффициента  $\gamma = 0.1$ . Для полной проверки предложенной идеи по разрушению циклона на начальном этапе его развития требуется, конечно, более полномасштабный эксперимент.

**Количественная оценка параметров рабочей системы.** Из приведенных выше данных следует, что для рабочей ветроэнергетической системы разрушения циклона на начальном этапе его зарождения можно принять коэффициент  $\gamma = 0.1$ , а для расчета энергии вентиляторов время  $T_w = 2000 \text{ s} < T_v$ . В результате для энергии одного вентилятора при его мощности в  $5 \text{ MW}$ , согласно (4), получим  $W_w \approx 10^{10} \text{ J}$ . Следовательно, при энергии циклона на начальном этапе  $W_c = 10^{12} \text{ J}$  и коэффициенте  $\gamma = 0.1$  для его разрушения потребуется 10 генераторов-вентиляторов. В случае повышения энергии до  $W_c = 10^{13} \text{ J}$  их число следует увеличить до 100.

## Список литературы

- [1] *Погосян Х.П.* Циклоны. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 148 с.
- [2] *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 455 с.
- [3] *Каганов В.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс. М.: Форум. Инфра-М, 2005. 432 с.
- [4] *Каганов В.И.* // Научные технологии. 2002. Т. 3. № 2. С. 31–37.