

УДК 551.511.3

**Мищенко Юрий Дмитриевич**

*кандидат технических наук, директор*

*Частное предприятие "Центр данных "Информматериал"*

**Мищенко Юрій Дмитрович**

*кандидат технічних наук, директор*

*Приватне підприємство "Центр даних "Інформматериал"*

**Mishchenko Iurii**

*Candidate of Technical Sciences, Director*

*Private Enterprise "Data Center "Informmaterial"*

## **МЕХАНИКА АТМОСФЕРНЫХ ЦИКЛОНОВ**

## **МЕХАНІКА АТМОСФЕРНИХ ЦИКЛОНІВ**

## **MECHANICS OF ATMOSPHERIC CYCLONES**

***Аннотация.** Отмечены особенности перемещения воздушных масс в циклонических образованиях. Проанализирована значимость и роль сил Кориолиса в атмосферном вихреобразовании. Отмечена недостаточность сил Кориолиса в общей энергетике циклонов. Предложена энергетическая модель формирования циклонов. Приведена формула отношений между некоторыми параметрами циклонов. Приведены расчетные примеры.*

***Ключевые слова:** циклон, энергия, вихреобразование, сила Кориолиса.*

***Анотація.** Відмічені особливості переміщення повітряних мас в циклонних утвореннях. Проаналізована значущість і роль сил Коріоліса в атмосферному вихороутворенні. Відмічена недостатність сил Коріоліса в загальній енергетиці циклонів. Запропонована енергетична модель формування циклонів. Приведена формула стосунків між деякими параметрами циклонів. Наведені розрахункові приклади.*

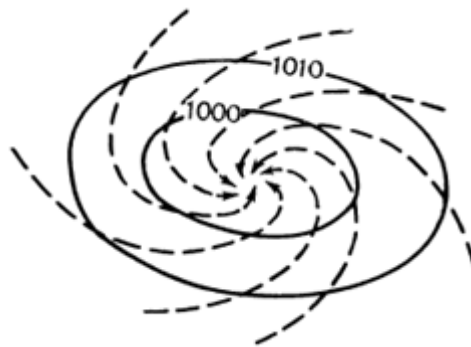
**Ключові слова:** циклон, енергія, вихороутворення, сила Коріоліса.

**Summary.** Peculiarities of air massive motion in cyclonic structures are discussed. Role of Coriolis force and its significance for atmospheric vortexes have been analyzed. Energy model of cyclone formation is suggested. The Coriolis forces are mentioned to be insufficient in the whole cyclonic energy balance. A relationship formula between some cyclone parameters has been presented as well as some calculation examples.

**Key words:** cyclone, energy, vortex creation, Coriolis force, weather forecast.

**Введение.** Циклон представляет огромный, нередко несколько тысяч километров в поперечнике, атмосферный вихрь. Циклонический характер перемещения воздушных масс Земной атмосферы описан во многих источниках и учебных пособиях, к примеру [1, с. 116]. Движение воздушных масс или, что субъективно ощущается как ветер, обусловлено разностью барического давления между отдельными участками атмосферы. Направление ветра и его сила в первую очередь зависит от градиента барического давления.

В циклоне атмосферное давление выше на внешних областях, поэтому движение воздушных масс происходит от периферии к центру. Схема перемещения воздушных масс в циклоне показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема перемещения воздушных масс в циклоне

Концетрическими овалами на рис 1 обозначены линии равных атмосферных давлений, именуемые изобарами. Градиент между изобарами определяет скорость движеения воздушных масс. Чем больше градиент давления (т.е. разность давлений над соседними участками), тем больше сила, воздействующая на воздух и тем сильнее ветер.

Важной особенностью циклонического движения является то, что воздух от области повышенного давления к области с пониженным давлением перемещается не крайчайшим путем, а по некоторой кривой. Линии тока принимают форму спиралей, сходящиеся к центру. Воздушные массы в циклоне перемещаются по спирали всегда против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном. Направление вращательного движения воздуха определяется отклоняющей силой Кориолиса [1, с. 116], появляющейся вследствие вращения Земли вокруг своей оси.

**Постановка задачи.** Распространенное утверждение, что закручивания воздушных масс в циклоне происходит исключительно за счет кориолисовых сил повсеместно распространяется от одной публикации к другой, приобретя статус "непогрешимой" аксиомы. Сложившееся по этому поводу устойчивое мнение, непроизвольно отодвинуло на второй план более глубокий анализ механики циклонического движения.

В системе координат, вращающейся с угловой скоростью  $\omega$ , материальная точка, двигающаяся с относительной скоростью  $v$ , участвует в сложном движении и, согласно теореме Кориолиса [2, с. 461], приобретает добавочное поворотное ускорение, равное векторному произведению  $2 \omega \times v$ , где  $\omega$  - вектор угловой скорости направлен по оси вращения согласно правилу правого винта. Вектор силы Кориолиса, выполняющий функцию центростремительной силы, приходящийся на единицу объема, равен произведению массы на ускорение Кориолиса, взятому со знаком минус

$$F_c = - 2\omega \times \rho v, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости или газа.

Мы знаем, что материальная точка равномерно движется по окружности, естественно при отсутствии других сил, если центростремительная сила, направленная от материальной точки к центру вращения, уравновешивается равной ей по величине, но противоположной по направлению центробежной силой, направленной от центра вращения к материальной точке. Точно также на вращающейся планете на каждую материальную точку, свободно двигающуюся по искривленной траектории, действуют помимо силы Кориолиса также центробежная сила. Эти силы могут уравновешивать друг друга.

В гидроаэромеханики введено понятие круга инерции, при котором соблюдается равновесие сил инерции [4, с. 436]

$$\frac{v^2}{R} = fv, \quad (2)$$

где  $v$  — относительная линейная скорость точки, направленная в горизонтальной плоскости.  $R = \frac{v}{f}$  — радиус кривизны траектории частицы,  $f = 2w \sin \varphi$  — параметр Кориолиса,  $\varphi$  -географическая широта.

Материальная точка совершает полный оборот по кругу инерции за период, равный  $\frac{2\pi}{f}$ .

Угловая скорость  $w$  вращения Земли равна  $\frac{2\pi \text{ рад}}{\text{сутки}}$  или  $0.729 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}}$ .

Значение параметра Кориолиса для средних широт равно

$$f = 2 \times 0.729 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}} \times \sin 60^\circ = 1.263 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}}$$

Представим гипотетически, что некоторая материальная точка движется относительно Земли со скоростью 2 м. в сек. Тогда радиус кривизны круга инерции этой точки относительно центра циклона будет равен

$$R = \frac{v}{f} = \frac{2 \frac{\text{м}}{\text{сек}}}{1.263 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}}} = 1583 \text{ км.},$$

период вращения этой точки составит

$$\frac{2\pi}{f} = \frac{2 \times 3.14}{1.263 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}}} = 17.36 \text{ суток.}$$

Аналогично, если линейная скорость вращения водяной воронки равна 10 см. в сек., круг инерции имеет радиус порядка 1 км.

Приведенные гипотетические примеры весьма далеки от реальности и показывают, что силами Кориолиса невозможно полностью объяснить вращательное движение воздушных масс в циклоне, либо вращения воронки вытекающей воды.

Представим водяную воронку радиусом 0,1 м, вращающуюся с линейной скоростью 0,3 м. в сек. Сила Кориолиса, действующая на массу в 1 кг., вращающейся воды по формуле (1) равна

$$F_c = 2w \times \rho v = 2 \times 1.263 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}} 1 \text{ кг} \times 0,3 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = 0,75 \times 10^{-4} \frac{\text{кг м}}{\text{сек}^2} \text{ (Ньютон)}$$

Требуемая необходимая сила, чтобы тело массой 1 кг равномерно двигалось со скоростью 0,3 м. в сек. по окружности радиусом 0.1м может быть найдена на основании второго закона Ньютона  $F = ma$  [3, с. 97-100].

Ускорение тела, двигающегося по окружности равно  $a = \frac{v^2}{r}$ , а сила

$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{1 \text{ кг} \times 0.3 \text{ м}^2}{0.1 \text{ м}} = 0.9 \frac{\text{кг м}}{\text{сек}^2} = 0.9 \text{ ньютон.}$$

Как видно из расчетов, сила  $F = 0.9$  ньютон необходимая для вращения водяной воронки, на 4 порядка превышает, сопутствующую этому вращению силу Кориолиса =  $0,75 \times 10^{-4}$  ньютон. Силы Кориолиса ничтожно малы, чтобы повлиять на вращение водяной воронки. Сила Кориолиса зависит от широты местности, приближаясь к нулю вблизи экватора. Но скорость вращения воронки вблизи экватора и вблизи полюса, как мы знаем, примерно одинакова, что также указывает на несостоятельность сил Кориолиса.

**Решение задачи.** Умозрительно представим отсутствие вращения Земли и соответственно отсутствие силы Кориолиса. Рассмотрим эту гипотетическую ситуацию на схеме рис. 2. В циклоне атмосферное давление выше на окраине, поэтому движение воздушных масс происходит от периферии к центру. На схеме это движение показано крупными стрелками. Будем считать, что градиент давлений примерно одинаков по всему срезу циклона

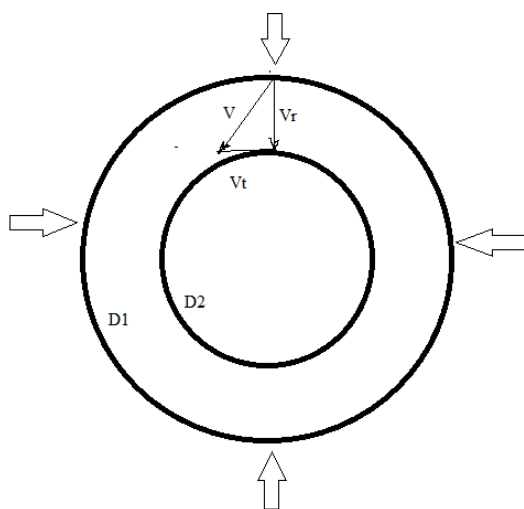


Рис. 2. Схема движения воздушных масс в циклоне

Важной характеристикой любого материального потока является его энергия. Кинетическая энергия движения  $E$  определяется известной формулой [3, с. 196]

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (3)$$

где  $m$  - масса тела;  $v$  - скорость тела. Кинетическая энергия - скалярная величина. Единицы измерения кинетической энергии -  $\text{кгм}^2/\text{сек}^2$  (джоуль).

Массу потока определим, как

$$m = \rho Sv, \quad (4)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости или газа;  $S$  - поперечное сечение;  $v$  - скорость потока.

Энергия движения потока с учетом (4) равна

$$E_{\text{дв}} = \frac{\rho S v^3}{2} \quad (5)$$

В плоской интерпретации на рис. 2, то есть без учета параметра высоты, энергия потока, имеющего скорость  $v_r$  по направлению к центру циклона, для области ограниченной диаметром  $D_1$  согласно формуле (5) составит

$$E_{1\text{дв}} = \frac{\rho \pi D_1 v_r^3}{2},$$

где  $v_r$  - радиальная скорость потока по направлению к центру.

Аналогично энергия движения потока, ограниченного диаметром  $D_2$  равна

$$E_{2\text{дв}} = \frac{\rho \pi D_2 v^3}{2},$$

где  $v$  – скорость потока для области  $D_2$ .

Плотность энергии, т. е. количество энергии в единице объёма для областей, ограниченных диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  примерно одинакова. Это вытекает из закона сохранения энергии. В природе постоянно происходит нивелирование уровней энергий. Циклоническое движение это тот же процесс выравнивание плотностей энергий между различными областями. Энергия передается от области с более высокой плотностью энергии к области с меньшей плотностью энергии. Энергия между областями перераспределяется и в конечном итоге выравнивается, но никогда не концентрируется. В процессе перераспределения энергий может происходить переход энергии из одной формы движения к другой форме движения.

Равенство энергетических состояний областей  $D_1$  и  $D_2$  можно записать уравнением

$$E_{1\text{дв}} = E_{2\text{дв}}$$

или в развернутом виде

$$\frac{\rho \pi D_1 v_r^3}{2} = \frac{\rho \pi D_2 v^3}{2}, \quad (6)$$

Формально скорость потока  $\mathbf{v}$  области  $\mathbf{D}_2$  в выражении (6) должна быть больше радиальной скорости  $\mathbf{v}_r$  области  $\mathbf{D}_1$ . В противном случае равенство (6) просто не будет выполняться, поскольку  $\mathbf{D}_1 > \mathbf{D}_2$ . Но радиальная скорость потока  $\mathbf{v}_r$  по направлению к центру циклона определяется величиной градиента давлений и не зависит от диаметра условной области.

Равенства (6) оказывается справедливым, при появлении дополнительной составляющей скорости при том, что радиальная скорость  $\mathbf{v}_r$  остается прежней. Дополнительная скорость появляется в виде тангенциальной компоненты  $\mathbf{v}_t$ . Появление  $\mathbf{v}_t$  неизбежно в силу закона сохранения энергии. Скорость  $\mathbf{v}$  в формуле (6) равна векторной сумме  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_t$ . На рис. 2 вектор  $\mathbf{v}$  образован геометрическим сложением векторов  $\mathbf{v}_r$  и  $\mathbf{v}_t$ .

Движение потока к центру по прежнему определено градиентом давлений, но к этому движению присоединяется боковое закручивание потока. По мере приближения к центру тангенциальная составляющая неуклонно растет, вызывая последовательную трансформацию энергии от поступательной к вращательной форме движения. Благодаря такой трансформации обеспечивается соблюдение закона сохранения энергии (6).

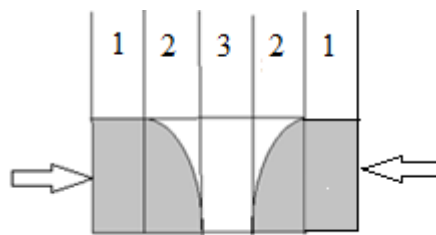
Если бы не происходило закручивание потока, то по мере приближения к центру, происходило бы уплотнение потока. Соответственно увеличивалась бы плотность энергии. Но это противоречит закону сохранения энергии. Энергия перераспределяется, но никогда не концентрируется. Если по каким либо причинам закручивания не происходит, то движение потока к центру должно затухать.

Закручивание потока происходит всегда даже в отсутствии сил Кориолиса, как в нашем гипотетическом примере, при невращающейся Земли. Подобный феномен, по всей видимости, имеет общеприродный характер. Возможно закручивание спиралеобразных галактик имеет ту же



природу, роль центробежных сил у которых выполняют силы гравитации.

Закручивание потока может произойти в любую сторону. Но в условиях Земли незначительные силы Кориолиса, в большинстве случаев оказываются достаточными, чтобы запустить процесс в определенном направлении. Рассмотрим этот момент более детально с использованием схемы энергетического состояния циклона на рис. 3.



**Рис. 3. Схема энергетического состояния циклона**

1 - энергия движения внешних областей  $E_{1дв}$ ; 2 – сумма энергии движения и энергии вращения  $E_{2дв} + E_{2вр}$ ; 3 – область условно нулевой энергии  $E=0$ .

Область условно нулевой энергии ( $E = 0$ ) представляет центральную воздушную область водяной воронки, либо центральную часть циклона ("глаз циклона").

Граница разграничения областей 1 и 2 соответствует моменту начала появления тангенциальной компоненты  $v_t$ . Граница разграничения областей 2 и 3 соответствует моменту максимального проявления тангенциальной компоненты  $v_t$ .

В установившемся круговом движении (точка разграничения областей 2 и 3) тангенциальные силы, как было показано выше, на 4 порядка превышают силы Кориолиса. Но в начале процесса (точка разграничения областей 1 и 2) тангенциальные силы весьма малы по сравнению с силами Кориолиса. В этот момент силы Кориолиса могут проявить себя в полной мере и запустить вращение потока в соответствующую сторону. Дальнейшее развитие процесса сопровождается прогрессирующим ростом

тангенциальных сил, а силы Кориолиса перестают оказывать заметное влияние.

Во внешних областях циклона тангенциальная составляющая скорости мала. По мере приближения к центру она растет - вращение усиливается. Вектор результирующей скорости все более увеличивает наклон. Вблизи центра циклона тангенциальная скорость приобретает главенствующее положение и поток фактически циркулирует по кругу вокруг "глаза" циклона.

С учетом закручивания потока энергетическое состояние циклона, в общем случае можно, записать следующим уравнением

$$E_{1дв} = E_{2дв} + E_{2вр}, \quad (7)$$

где  $E_{1дв}$  - энергия внешних областей циклона в поступательном движении;  $E_{2дв}$  - энергия внутренних областей циклона в поступательном движении;  $E_{2вр}$  - энергия внутренних областей циклона во вращательном движении.

Диаметр водяной воронки или "глаза циклона" (область "3" рис. 3 ) имеет конечные размеры и определяется равновесием центростремительных и центробежных сил. В циклоне роль центростремительных сил выполняет градиент давлений, в водяной воронке – силы тяжести. Центробежная сила равна  $F = \frac{mv^2}{r}$ , где  $m$  - масса, участвующая в круговом движении;

$v$  - линейная круговая скорость ( $v_t$ ) ;  $r$  - радиус окружности. Радиус воронки установится

$$r = \frac{mv_t^2}{F}.$$

Радиус воронки  $r$  прямо пропорционален квадрату тангенциальной скорости и обратно пропорционален центробежной силе, которая в установившемся движении равна центростремительной силе. Роль центростремительной силы, как отмечено выше, у циклона выполняет градиент давлений.

Вращательное движение характеризуется кинетической энергией [3]

$$E_{\text{вр}} = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (8)$$

где  $J = mr^2$  – момент инерции.

Вращающуюся массу  $m = \rho\pi Dv_r$  и выражение угловой скорости  $\omega = \frac{v_t}{r}$ , подставив в формулу (8), получим

$$E_{\text{вр}} = \frac{\rho\pi Dv_r v_t^2}{2}.$$

Окончательно баланс энергий между областями  $D_1$  и  $D_2$  согласно (7) запишется в виде

$$\frac{\rho\pi D_1 v_r^3}{2} = \frac{\rho\pi D_2 v_r^3}{2} + \frac{\rho\pi D_2 v_r v_t^2}{2}. \quad (9)$$

Выполнив сокращения правой и левой части равенства (9), получим

$$D_1 v_r^3 = D_2 v_r^3 + D_2 v_r v_t^2. \quad (10)$$

Из (10) можно вывести полезное отношение

$$v_t = v_r \sqrt{\frac{D_1 - D_2}{D_2}}. \quad (11)$$

Из равенства (9) следует, что плотность энергии около центра циклона не превышает плотности энергии удаленных областей. Подобное утверждение требует разъяснения, поскольку наибольшие разрушения, как известно, приносят именно центральные области ураганов. Эти разрушения, в общем случае, эквивалентны выполнению некоторого объема механической работы. В механике работа равна произведению модуля силы на модуль перемещения. Чем больше приложенная сила, тем больший объем работы она способна выполнить в единицу времени. Сила же в нашем случае – это результат динамического воздействия ветра на препятствие, преграждающие ему движение. Из аэродинамики мы знаем, что сила аэродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости потока. Скорость ветра ближе к центру циклона может значительно превысить скорость ветра окраенных областей. Подобное увеличение

скорости происходит не за счет концентрации энергии, а, как отмечено выше, за счет последовательной трансформации поступательной формы движения во вращательную форму движения. Механика движения циклона сопровождается перераспределением сил, а не концентрацией энергии.

**Расчетные примеры.** Представим циклон диаметром 1500 км., у которого зафиксирован ветер со скоростью 5 м. в сек. на удалении 750 км. от центра. Определим ожидаемую скорость ветра вблизи "глаза" циклона, имеющего диаметр 20 км. по формуле (11)

$$v_t = 5 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \sqrt{\frac{(1500000_{\text{м}} - 20000_{\text{м}})}{20000_{\text{м}}}} = 43 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \text{ или } 154,8 \frac{\text{км}}{\text{час}}$$

Результирующая скорость  $v$  вблизи "глаза" циклона приблизительно можно считать равной  $v_t$  поскольку  $v_t \gg v_r$ .

Другой пример: циклон такого же диаметра 1500 км. Ветер на окраине циклона 3 м. в сек., а диаметр центральной области 200 км. Скорость ветра на границе этой области будет равна

$$v_t = 3 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \sqrt{\frac{(1500000_{\text{м}} - 200000_{\text{м}})}{200000_{\text{м}}}} = 7,65 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \text{ или } 27,54 \frac{\text{км}}{\text{час}}$$

Пример с водяной воронкой: диаметр вращающейся воронки 10 см.; скорость движения воды к центру на удалении 50 см от центра воронки - 3 см. в сек. Линейная скорость вращения воронки будет

$$v_t = 0,03 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \sqrt{\frac{(1_{\text{м}} - 0,1_{\text{м}})}{0,1_{\text{м}}}} = 0,09 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \text{ или примерно } 10 \text{ см. в сек.}$$

### **Выводы.**

1. Механика циклонического движения следует законам сохранения энергии.
2. Закручивание потока, располагающего запасом кинетической энергии, происходит всегда в его центробежном движении.

3. В условиях Земли силы Кориолиса способны задать направление вращения потока, но на дальнейшее развитие процесса они не оказывают влияние.
4. Механика циклона сопровождается перераспределением сил за счет трансформации форм движения.
5. Скорость ветра в центре циклона определяется ветрами периферийных областей и размером самого циклона.

### **Литература**

1. Зубащенко Е.М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 1. / Е.М. Зубащенко, В.И. Шмыков, А.Я. Немыкин, Н.В. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 183 с.
2. Тарг С. М. Кориолиса сила // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — С. 461. — 704 с.
3. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга – М. Наука, 1985.
4. Халтинер Дж. Мартин Ф. Динамическая и физическая метеорология. М.: Иностранная литература.— 1960.— 436 с.