

01;03

Механизм движения жидкости и газа по спирали на участках крутого поворота тракта

© Г.Р. Мингалеева

Казанский государственный энергетический университет

Поступило в Редакцию 9 января 2002 г.

Рассматривается картина течения внутреннего и внешнего потоков жидкости и газа на участках крутого изгиба под прямым углом пути их движения. Показывается, что из-за высокого гидравлического сопротивления энергетически более выгодным является течение на таких участках по спирали с закруткой, что в действительных условиях спонтанно реализуется. Приводится и анализируется конкретный пример (атмосферный циклон), демонстрирующий этот гидравлический фактор.

Во многих природных явлениях и технических устройствах имеются участки крутых поворотов (изгибов) потоков жидкости и газа. Как показывают наблюдения, такие участки преодолеваются движущейся средой спонтанным вращением по спирали и нередко с образованием нескольких спиральных макро- и микровихрей с некоторой спецификой в их формах в зависимости от возможностей системы к самоорганизации. На рис. 1 приводятся примеры таких случаев течения.

Эти данные, включающие в себя в обобщенном виде разномасштабные явления, свидетельствуют о существовании единого механизма самозакрутки потоков жидкости и газа в отмеченных выше условиях. Здесь этот механизм рассматривается с использованием энергетического метода.

Как известно, течение на участках крутого изгиба под прямым углом связано с необходимостью преодоления больших местных гидравлических сопротивлений, следовательно и значительными энергетическими затратами. Например, местное сопротивление колена, изогнутого под углом 90° , в зависимости от его геометрии может составить от 0.2 до 10 входных скоростных напоров. Нижний предел относится к колену „оптимальной формы“ с самозакруглением острых кромок изгиба, без ударов струй и деформации формы и размеров их поперечных сечений,

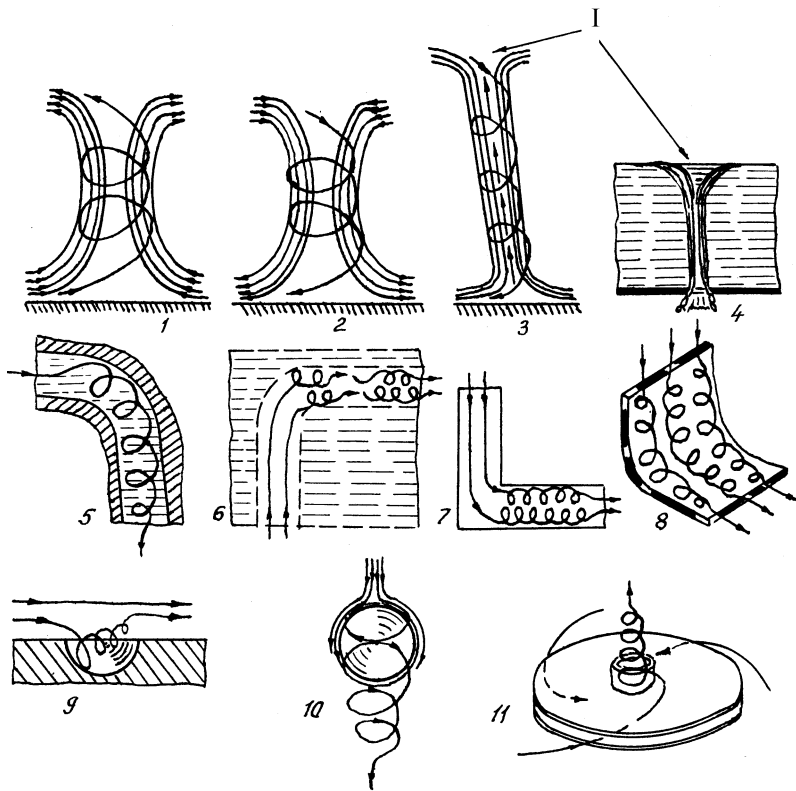


Рис. 1. Примеры спонтанного течения осевого потока жидкости и газа по спирали или с образованием макро- и микровихрей на участках крутого поворота под прямым углом: 1 — атмосферный циклон; 2 — антициклон; 3 — смерч; [1-4]; 4 — воронка в жидкости [5,6]; 5 — течение на повороте реки [7]; 6 — течение на повороте океанической струи [8]; 7 — течение внутри колена с изгибом на 90° с острыми кромками на повороте [9]; 8 — течение на вогнутой стенке [10]; 9 — течение при обтекании струей полусферического углубления [11,12]; 10 — течение при обтекании шара струей [13]; 11 — течение при отсосе воздуха из радиальной щели через центральное отверстие [14]; I — глаз смерча или воронки.

а верхний — к случаю выхода потока из такого колена с острой кромкой поворота и деформацией выходного сечения [9].

Приведенные значения местного сопротивления существенно превышают долю сопротивления трения, составляющего для объектов с отношением $L/D \approx 1$, характерным для участков изгиба, в достаточно широком диапазоне изменения числа Рейнольдса не более десятой доли входного скоростного напора, поскольку наиболее типичный интервал изменения коэффициента сопротивления трения $\lambda = 0.01-0.1$ (L и D — продольный и поперечный размеры объекта).

В такой ситуации возможно движение потока либо в упор препятствию с большими энергетическими затратами, либо в обход этого препятствия. Совершенно очевидно, что жидкости и газы, имея возможности к самоорганизации, потекут по пути наименьшего сопротивления в соответствии с известными законами механики. Такой путь здесь есть — это плавное движение по спирали. Такие элементы, как спирали (змеевики), не имеют участков с крутым изгибом, поэтому для них существуют только потери энергии на преодоление сопротивления трения, правда, с несколько повышенной величиной коэффициента гидравлического сопротивления трения. Тем не менее эти потери заметно малы по сравнению с затратами на преодоление крутых изгибов при величине местного коэффициента сопротивления $C_1 \approx 0.2$ и несравненно малы с учетом, что на крутых изгибах под прямым углом течение жидкости и газа, как правило, сопровождается лобовым ударом струй или ударом их о стенку и деформацией их поперечных сечений, когда $C_1 \rightarrow 10$.

Ниже эти соображения более конкретно рассматриваются применительно к выбранному в качестве примера случаю движения воздушных масс в атмосферном циклоне средних размеров.

На рис. 2, А приводится такой циклон в стадии его зарождения, т.е. еще без вращения, следовательно, и без зоны разрежения и обратных циркуляционных токов в центре, с указанием основных размеров, используемых в дальнейшем анализе, как для одного из исследованных случаев [3].

Наиболее типичным является образование циклона по следующей схеме.

Массы воздуха, подогреваемые и насыщаемые водяным паром теплым участком $a-b$ подстилающей поверхности, вследствие конвекции, вызванной эффектом плавучести, поднимаются кверху в виде столба.

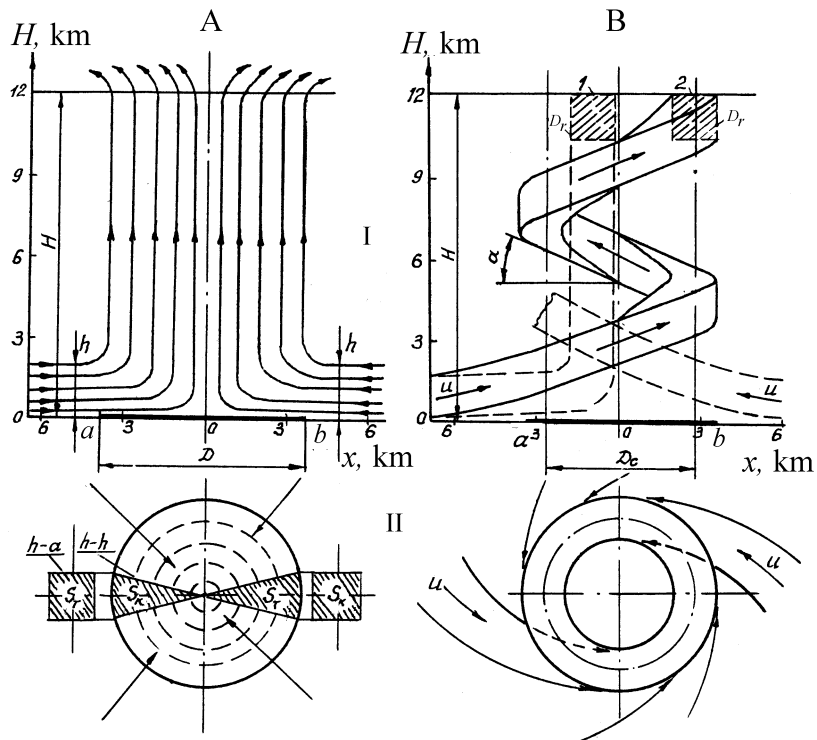


Рис. 2. Режимы течения воздуха в атмосферном циклоне. *A* — течение без закрутки в стадии зарождения; I — вертикальный разрез; II — горизонтальный разрез у поверхности; S_r и S_k — поперечные сечения отдельной струи до и после поворота. *B* — течение по спирали; I — вид сбоку со штриховкой поперечных сечений сравниваемых вариантов струй: 1 — прямой с изгибом в начале, 2 — спиральной; II — вид на течение сверху.

К освобождающемуся месту с пониженным давлением из окружающего более холодного приземного слоя по радиальным путям притекают новые порции воздуха, которые, достигнув участка $a-b$, прогревшись и насытившись там водяным паром, круто, под углом 90° берут направление вверх. В итоге в соответствии с условием сплошности потока устанавливается непрерывное сквозное течение с очевидным

соотношением $\pi Dh \approx \pi D^2/4$ (при $\rho u \approx \text{const}$), откуда $h \approx 0.25 D$ (h — высота приземного слоя на входе в зону $a-b$; D — ее эквивалентный диаметр; ρ и u — местные значения плотности и скорости воздуха). Циклон подобен тепловой машине, работающей от солнечной энергии.

Здесь налицо отмеченный выше энергетически не выгодный крутой поворот течения воздуха из горизонтального в вертикальное направление, причем этот поворот происходит с лобовым ударом двигающихся навстречу струй и деформацией их поперечных сечений (сечения S_2 и S_4). Поэтому в следующий момент времени этот режим по отмеченным выше причинам спонтанно переходит в форму подъема по спирали.¹ На рис. 2, В схематически показан процесс для отдельной закрученной струи в сопоставлении с аналогичной прямой струей с участком изгиба в начале, выделенной пунктиром.

Выбрав для сравнения отдельные струи, несложными расчетами по общепринятой методике можно показать, что мощность, затрачиваемая на преодоление гидравлического сопротивления при подъеме воздуха на высоту H по спирали с углом подъема α , по соотношению

$$N_3 = Q\Delta p_{23} = Q\lambda_{23} \frac{H}{D_r \sin \alpha} \frac{\gamma u^2}{2g},$$

получается заметно меньше таковой для случая движения и подъема одинаковых объемов воздуха с одинаковыми скоростями по прямому столбику с изгибом, определяемой по аналогичному соотношению

$$\begin{aligned} N_0 &= Q(\Delta p_{20} + \Delta p_{10}) = Q \left(\lambda_{20} \frac{H}{D_r} \frac{\gamma u^2}{2g} + C_{10} \frac{\gamma u^2}{2g} \right) \\ &= Q \frac{\gamma u^2}{2g} \left(\lambda_{20} \frac{H}{D_r} + C_{10} \right). \end{aligned}$$

Здесь N — затрачиваемая на движение воздуха в струе мощность; Q — объемный расход воздуха; Δp — преодолеваемое гидравлическое сопротивление. Индексы: 1 — местное сопротивление; 2 — сопротивление трения; 3 — для спиральной и 0 — для прямой струи. Угол подъема спирали, как показывают непосредственные наблюдения за поведением атмосферных смерчей, колеблется в пределах $\alpha \approx 45-65^\circ$ [2]. Типичные

¹ Излагаемая здесь версия самозакрутки циклонического образования не умаляет роль других многочисленных факторов, описанных в литературе [1-4].

значения $\lambda_{20} = 0.01 - 0.1$, $\lambda_{23} = 0.03 - 0.15$ (для $Re = 10^3 - 10^6$) и $C_1 = 0.2 - 10$ [9]. Фигурирующие в расчетах геометрические размеры указаны на рис. 2.

Момент перехода в более устойчивый режим течения по спирали (как и направление вращения: по часовой стрелке или против) носит вероятностный характер и в первую очередь зависит от степени асимметрии фона. Если асимметрия фона случайно окажется идеальной, то вращение может и не наступить с последующим угасанием вертикального циркуляционного движения по мере удаления столба воздуха от места зарождения. Однако закономерности спонтанного нарушения симметрии пока не рассматриваются.

Явление преодоления гидравлического сопротивления участка крутого поворота под прямым углом энергетически более выгодным движением по спирали в дальнейших ссылках на него удобнее назвать сокращенно „гидравлическим фактором“.

Нетрудно показать, что гидравлический фактор играет ведущую роль во всех случаях самовращения потока по спирали, перечисленных на рис. 1.

Следует также иметь в виду, что гидравлический фактор наиболее четко проявляется в определенном интервале изменения определяющего процесс безразмерного критерия (числа Рейнольдса, Дина, Гёртлера, Тейлора, Эйлера и др.), границы которого с учетом вероятностно-статистического характера явления должны быть установлены на основании дополнительных исследований.

Существуют основания предполагать, что гидравлический фактор не зависит от масштабов системы (гигантский циклон или маленькая воронка) и имеет универсальный характер. Узел изгиба потока жидкости и газа, создавая неустойчивую ситуацию, в асимметричном фоне оказывается генератором спонтанного движения среды по спирали или серии спиральных макро- и микровихрей.

Список литературы

- [1] *Бялко А.В.* Наша планета — Земля. М.: Наука, 1983. 208 с.
- [2] *Наливкин Д.В.* Смерчи. М.: Наука, 1984. 112 с.
- [3] *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. М.: Физматгиз, 1958. 476 с.
- [4] *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 751 с.

- [5] *Поликовский В.М., Перельман Р.Г.* Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью. М.–Л.: ГЭИ, 1959. 190 с.
- [6] *Логвинович Г.В., Буйвол В.Н., Дудко А.С.* и др. Течения со свободными поверхностями. Киев: Наук. думка, 1985. 295 с.
- [7] *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
- [8] *Thierry P., Doron N.* // Deep-Sed Res Pt. 1 (Deep-Sed Res. A.) 1996. V. 43. N 9. P. 1475–1507.
- [9] *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 560 с.
- [10] *Шлихтинг Г.* Возникновение турбулентности. М.: ИЛ, 1962. 204 с.
- [11] *Чудновский Я.П., Козлов А.П., Щукин А.В.* и др. // Известия РАН. Энергетика. 1998. № 3. С. 39–46.
- [12] *Исаев С.А., ак.Леонтьев А.И., Баранов П.А.* и др. // ДАН. 2000. Т. 373. № 5. С. 615–617.
- [13] *Гольдштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И.* Вязкое течение с парадоксальными свойствами. Новосибирск: Наука СО, 1989. 336 с.
- [14] *Гольдштик М.А., Штерн В.Н.* // ПММ. 1989. Т. 53. Вып. 4. С. 619–624.