

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

PhD, Director

Private Enterprise "Data Center "Informmaterial"

**ПРИРОДА ТУРБУЛЕНТНОСТИ СТРУЙ ПОТОКОВ
ПРИРОДА ТУРБУЛЕНТНОСТІ СТРУМЕНІВ ПОТОКІВ
THE NATURE OF TURBULENCE OF JETS OF STREAMS**

***Аннотация.** Понимание природы турбулентности остается важнейшей нерешенной проблемой современности. Особенно актуально выяснение физики явления. В настоящей работе предложена физическая модель турбулентности струй потоков. В основу модели положены проверенные практикой факторы, сопутствующие появлению турбулентности: скорость потока, размер области, вязкость среды, масштаб времени. Теоретические выводы приведены к аналитическому выражению, определяющему характер движения струй.*

***Ключевые слова:** природа турбулентности, физика турбулентности, энергия, струя.*

***Анотація.** Розуміння природи турбулентності залишається найважливішою невирішеною проблемою сучасності. Особливо актуально з'ясування фізики явища. У даній роботі запропонована фізична модель*

турбулентності струменів потоків. В основу моделі покладено перевірені практикою фактори, супутні появи турбулентності: швидкість потоку, розмір області, в'язкість середовища, масштаб часу. Теоретичні висновки приведені до аналітичного вираження, яке визначає характер руху струменів.

Ключові слова: природа турбулентності, фізика турбулентності, енергія, струмінь.

Summary. Understanding the nature of turbulence remains the most important unsolved problem of our time. Elucidation of the physics of the phenomenon is especially important. In this work, we propose a physical model of turbulence of jet streams. The model is based on the factors proven by practice that accompany the appearance of turbulence: flow velocity, size of the region, viscosity of the medium, and time scale. Theoretically, the conclusions are reduced to an analytical expression that determines the nature of the motion of the jets.

Key words: nature of turbulence, physics of turbulence, energy, jet.

Введение. Известные определения турбулентности отражают лишь часть свойств этого явления.

П. Брэдшоу [1] определял турбулентность как трехмерное нестационарное движение, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение хаотических пульсаций параметров потока (скорости, давления и т.д.).

Т. Карман [2] считал, что турбулентность неупорядоченного движения связана с обтеканием непроницаемых поверхностей, или же, когда соседние потоки одной и той же среды следуют рядом или проникают один в другой.

И. Хинце [3] предполагал обязательное наличие в турбулентном движении различных величин, претерпевающих хаотическое изменение во времени и по пространственным координатам.

Перечень определений постоянно пополняется. В последнее время можно встретить примерно такое определение: турбулентность — это бурное, беспорядочное течение жидкости (или газа), проявляющееся в появлении нелинейных фрактальных волн, возникающих при увеличении скорости течения.

Однозначного определения турбулентности пока не существует. Расплывчатость и неоднозначность определений, свидетельствует о невыясненной до нашего времени природе турбулентности.

Турбулентность связана с неустойчивостью потока в целом. Проявляется в виде совокупности разномасштабных вихрей, которые обычно видны и хорошо различимы. Вихрь объединяет в круговое движение совокупность частиц среды, принадлежащих к одной из струй потока.

Постановка задачи. Реальный поток складывается из совокупности струй. Под струей подразумеваем часть среды, ограниченной поверхностью траекторий точек замкнутого контура. Одну из струй схематически представим на рис. 1.

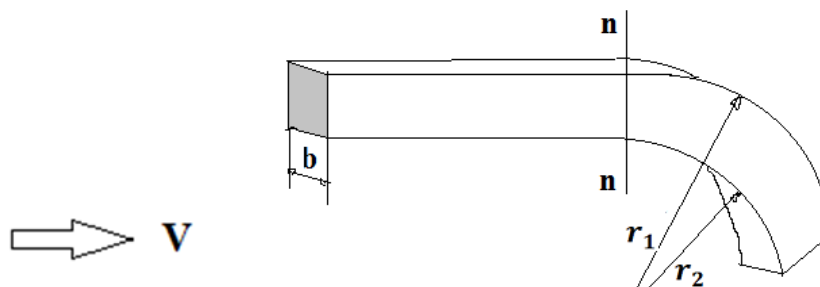


Рис. 1. Схема отдельной струи

До области, отмеченной секущей $n-n$, движение струи имеет ламинарный характер, при котором все частицы с одинаковой скоростью

движутся параллельными прямолинейными траекториями. После границы, отмеченной секущей $n-n$, частицы струи по каким-то причинам искривляют траекторию своего движения.

Из законов классической механики – частицы в отсутствии действующих сил находятся в покое или движутся прямолинейно. Прямолинейное и равномерное движение частиц в струе свидетельствует о взаимном уравнивании действующих сил, когда силы сопротивления уравниваются силами движения.

Искривление траекторий частиц происходит в результате воздействия неуравновешенных сил, направленных под углом к скорости. Отношение действующих сил в искривленной струе несколько иное, чем в прямой струе. Кроме этого в искривленной струе из-за возникновения градиента скорости дополнительно появляются тормозящие силы вязкого трения.

Источников внешней энергии нет. Энергия для искривления струи передается от предшествующего прямолинейного участка. Энергия искривленной струи не может превысить энергию прямой струи, из которой она образовалась.

На преодоление сил сопротивления расходуется кинетическая энергия струи. Струя, подобно ручейку на пересеченной местности, "выбирает" путь наименьшего сопротивления с наименьшими затратами энергии. Более экономным, при этом, может оказаться не прямой путь. Движение по искривленному пути в ряде случаев требует меньших затрат энергии, чем прямолинейное движение. Для нашего случая отмеченная ситуация описывается неравенством

$$E_{\text{лам.}} > E_{\text{турб.}} + E_{\text{вяз.}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{лам.}}$ – энергия прямой струи; $E_{\text{турб.}}$ – энергия искривленной струи; $E_{\text{вяз.}}$ – энергия на преодоления сил вязкости в искривленной струе.

Если выполняется условие (1), струя переходит от прямолинейного к искривленному движению, при котором затраты энергии ниже.

Аналогично, возможна противоположная ситуация, когда струя восстанавливает прямолинейное движение из криволинейного при соблюдении обратного неравенства

$$E_{\text{турб.}} + E_{\text{вяз.}} > E_{\text{лам.}} \quad (2)$$

Задача состоит в определении условий, при которых кинетическая энергия искривленной струи оказывается ниже кинетической энергии прямой струи.

Решение задачи. Используем схему на рис. 1. Кинетическая энергия прямолинейного участка струи

$$E_{\text{лам.}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho b (r_1 - r_2)v^3 t}{2}, \quad (3)$$

где масса $m = \rho b (r_1 - r_2)vt$; v – скорость; ρ – плотность (единицы измерения $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

Кинетическая энергия искривленной струи по радиусам r_1, r_2

$$E_{\text{турб.}} = \frac{1}{2}Jw^2 = \frac{\rho b \pi (r_1^4 - r_2^4)v^2}{(r_1 + r_2)^2}, \quad (4)$$

где момент инерции

$$J = \frac{\rho b \pi (r_1^4 - r_2^4)}{2}, \quad (5)$$

угловая скорость

$$w = \frac{2v}{r_1 + r_2}. \quad (6)$$

На криволинейном участке частицы, перемещающиеся по радиусам r_1 и r_2 , имеют отличающиеся скорости. Со стороны слоя с большей скоростью появляются силы, ускоряющие движение, а со стороны слоя с меньшей скоростью появляются силы, замедляющие движение. Величина этих сил зависит от вязкости среды и от разности скоростей между слоями.

Силу вязкого трения между слоями определим по формуле Ньютона [4]

$$F = \mu \frac{dv}{dr} S = \mu \frac{2v(r_1 - r_2)}{r_1 + r_2} bvt = \mu btv^2 \frac{2}{r_1 + r_2}, \quad (7)$$

где $dr = r_1 - r_2$; $dv = \frac{2v(r_1 - r_2)}{r_1 + r_2}$; $S = bvt$; μ - коэффициент динамической вязкости.

Перепишем уравнение (7), поменяв μ на коэффициент кинематической вязкости γ через отношение $\mu = \gamma\rho$

$$F = \gamma\rho btv^2 \frac{2}{r_1 + r_2}. \quad (8)$$

Энергия на преодоление сил вязкого трения равна произведению силы на путь

$$E_{\text{вяз.}} = Fvt = \gamma\rho btv^2 \frac{2}{r_1 + r_2} vt = 2 \frac{\gamma\rho bt^2 v^3}{r_1 + r_2}. \quad (9)$$

Подставим найденные значения $E_{\text{лам.}}$, $E_{\text{турб.}}$ и $E_{\text{вяз.}}$ в условие (1).

$$E_{\text{лам.}} > E_{\text{турб.}} + E = \frac{\rho b (r_1 - r_2) v^3 t}{2} > \frac{\rho b \pi (r_1^4 - r_2^4) v^2}{(r_1 + r_2)^2} + 2 \frac{\gamma \rho b t^2 v^3}{r_1 + r_2}. \quad (10)$$

Упростим (10), поделив все члены на $\rho b v^2$

$$\frac{(r_1 - r_2) vt}{2} > \frac{\pi (r_1^4 - r_2^4)}{(r_1 + r_2)^2} + 2 \frac{\gamma t^2 v}{r_1 + r_2} \quad (11)$$

Введем коэффициент k , определяющий относительную толщину струи.

$$k = \frac{r_2}{r_1} \text{ или } r_2 = kr_1, \quad (12)$$

Применим k для (11)

$$\frac{r_1(1-k)vt}{2} > \frac{\pi r_1^2(1-k^4)}{(1+k)^2} + 2 \frac{\gamma t^2 v}{r_1(1+k)} \quad (13)$$

Выражение (13) в параметрах потока определяет условие, при котором произойдет искривления струи.

Анализ критерия (13) выполним при помощи построения графиков. Один из графиков, показывающий уровень кинетической энергии прямого участка, представим левой частью (13) $\left[\frac{r_1(1-k)vt}{2} \right]$. Второй график, отождествляющей уровень энергии искривленного участка, представим правой частью (13) $\left[\frac{\pi r_1^2(1-k^4)}{(1+k)^2} + 2 \frac{\gamma t^2 v}{r_1(1+k)} \right]$.

Оба графика строим в общих координатах путем наложения одного графика на другой. Функция (13) задана двумя аргументами r_1 и k , поэтому графики отобразятся плоскостями в трехмерном пространстве.

Для примера, построим графики следующих исходных данных:

- размер струи r_1 в пределах 0.1-0.2 м.;
- скорость в интервале от 0.3 м\сек. до 1.3 м\сек.;
- вязкость среды $\gamma = 1.51 * 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ (воздух);
- временной интервал 1 сек.

Энергия прямого участка струи на графиках отмечена плоскостью "Ламинарный". Энергия искривленного участка отмечена плоскостью "Турбулентный".

Как и ожидалось, кинетическая энергия прямого участка струи пропорционально возрастает с увеличением скорости. Плоскость "Ламинарный" последовательно перемещается вверх по ординате "Энергия E" по мере роста скорости от 0.3 м\сек. до 1.3 м\сек.

Иначе происходит с плоскостью "Турбулентный". Энергия для искривления струи не зависит от скорости потока $E_{\text{турб.}} = \frac{\pi r_1^2(1-k^4)}{(1+k)^2}$. Влияние скорости для искривленной струи проявляется только из-за появления вязкой составляющей $E_{\text{вяз.}} = 2 \frac{\gamma t^2 v}{r_1(1+k)}$, которая в силу малости $\gamma = 1.51 * 10^{-5}$ не оказывает значительного влияния. Плоскость

“Турбулентный”, для выбранного примера, почти не перемещается по ординате “Энергия E” с ростом скорости от 0.3 м\сек. до 1.3 м\сек.

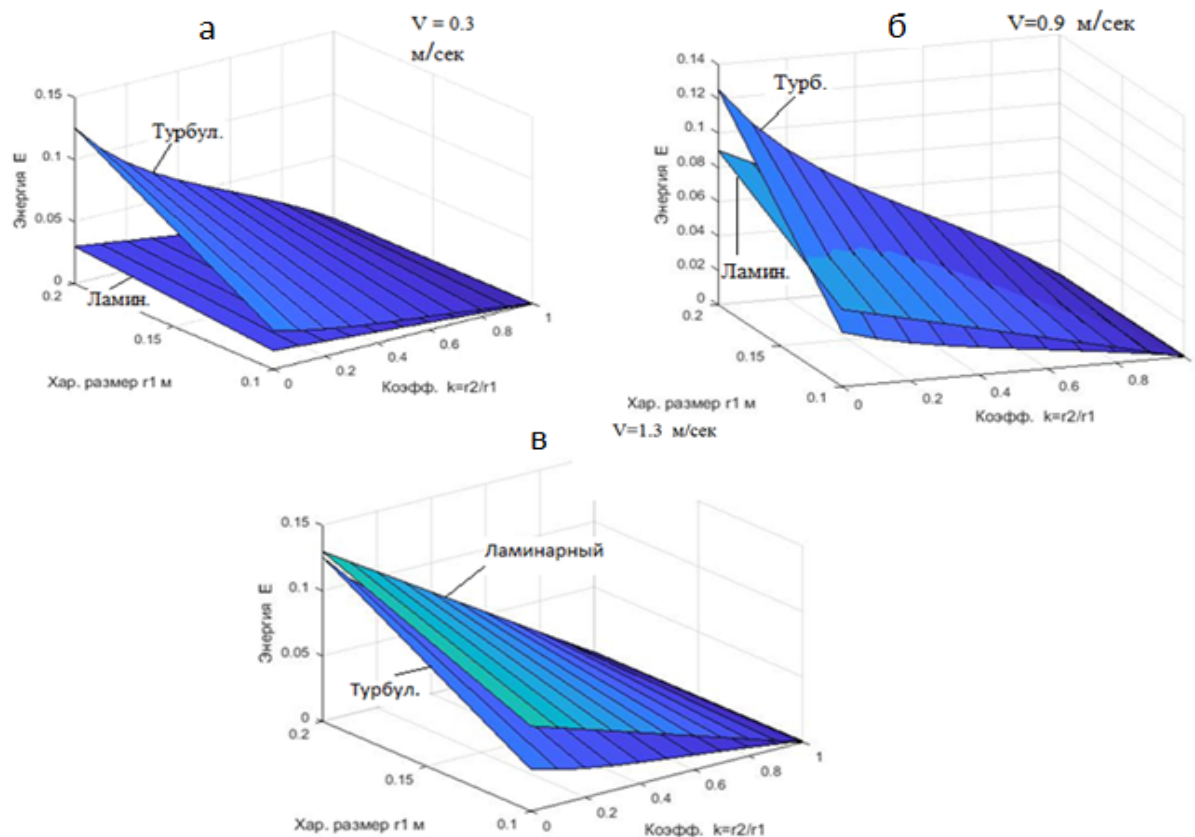


Рис. 2. Сопоставление энергий ламинарного и турбулентного участков струй при скоростях : а-0.3 м\сек.: б-0.9 м\сек.: в- 1.3 м\сек.

При скорости 0.3 м\сек. рис 2(а) кинетической энергии прямого участка недостаточно, чтобы искривить струю по радиусам 0.1-0.2 м. Плоскость “Ламинарный” лежит ниже плоскости “Турбулентный”.

При скорости 0.9 м. в сек. рис 2(б) для струй, начиная с размера $r_1 \approx 0.15$ м и меньше, создаются условия для искривления струи. Линия пересечения плоскостей “Ламинарный” и “Турбулентный” отмечает критический размер струи, при которой возможно ее искривление. Струи размера 0.15 м искривляются при скорости 0.9 м. в сек.

При скорости 1.3 м. в сек. рис. 2(в) энергии ламинарного прямого участка с запасом хватает для искривления струй размеров от 0.1 до 0.2 м.

Для каждого размера струй существует определенная скорость, при которой происходит их изгиб. Существует и обратный процесс - возврат струи к исходному прямому состоянию из-за снижения скорости, .

Видоизменение характера движения струй сопровождается снижением уровня кинетической энергии. Снижение энергии происходит как при искривлении струи, так и при возвращении струи к исходному прямому состоянию.

Траектория искривленных струи описывает замкнутый контур. Окружность - кратчайший путь замкнутого контура. Минимум затрат энергии происходит на кратчайшем пути. Изгибаясь, струи движутся по радиусам окружностей образуя вихри.

Исследование результатов. Перепишем формулу (13) для определения критической скорости $v_{\text{крит.}}$, при которой струя искривится

$$v_{\text{крит.}} = \frac{2\pi r_1^3(1-k^4)}{(1+k)[r_1^2 t(1-k^2) - 4\gamma t^2]}. \quad (14)$$

Произвольно выберем $r_1=0.007\text{м}$, $\gamma = 1.51 \cdot 10^{-5}$, $t = 1$ сек. Расчеты выполним в интервале значений $k=0 \div 1$.

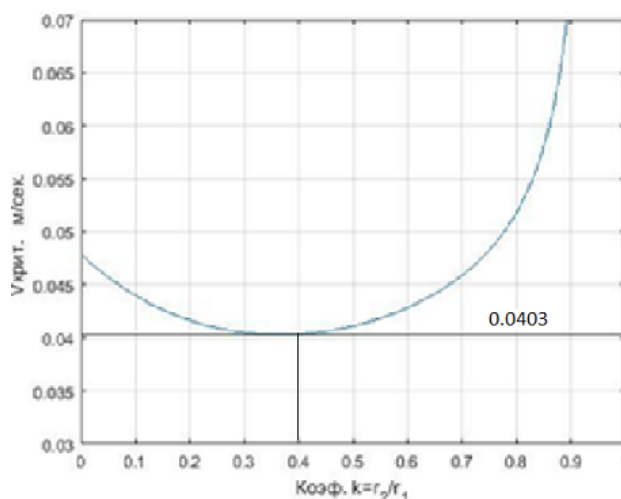


Рис. 3. Зависимость $v_{\text{крит.}}$ от коэффициента k

Функция (14) имеет экстремум в точке минимума

$$k = \frac{r_2}{r_1} = 0,4 .$$

Относительная толщина струи 0,4 соответствует наименьшему значению $v_{\text{крит.}}$ и соответственно требует минимум энергии для искривления. Струи подобных пропорций имеют наибольшее распространение в природе. Действительно на фотографиях (рис. 4) отношения внутреннего радиуса r_2 к внешнему радиусу r_1 примерно соответствует 0,4. Отмеченная закономерность присуща как микровихрям, так и мегавихрям.

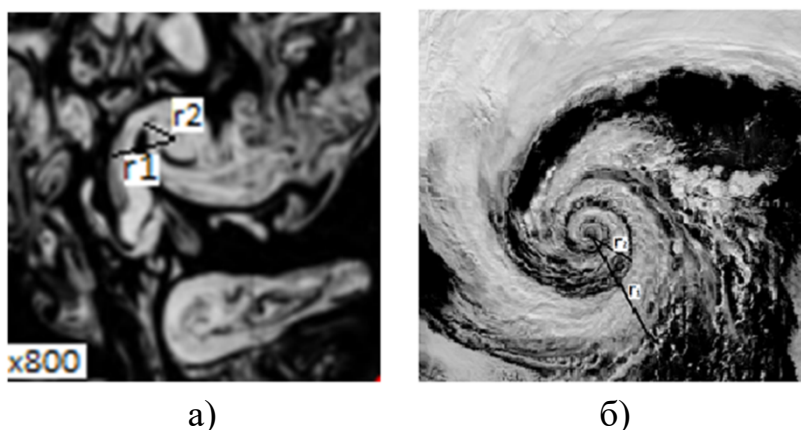
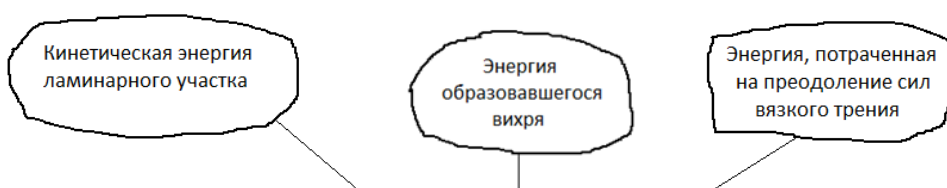


Рис. 4. а – микровихрь в потоке; б – атмосферный циклон

Используем фиксированное значение $k = 0,4$ для упрощения критерий (13).



$$0.3vtr^2 - 1.56r^3 - 1.43yvt^2 = 0, \quad (15)$$

где параметр r – принимает смысл характерного размера струи; v, t, y – скорость, масштаб времени и кинематическая вязкость - соответственно.

Область положительных значений функции (15) соответствует состоянию искривленной струи, а отрицательных – прямой струе. Все

члены функции (15) имеют размерность(м³) – характерного объема расчетной области.

Характерно, что формула (15) в иной записи фактически повторяет, широко используемый на практике эмпирический критерий О. Рейнольдса [6]

$$Re = \frac{vD}{\gamma} , \quad (16)$$

где v – скорость; D - характерный размер; γ - вязкость среды. Как в критерии О. Рейнольдса (16), так и в формуле (15) используются одни и те же задающие параметры(скорость, размер, вязкость). Отличие состоит в отсутствии обезличенного числа Re и в появлении параметра времени t .

Влияние времени продемонстрировано на рис. 5.

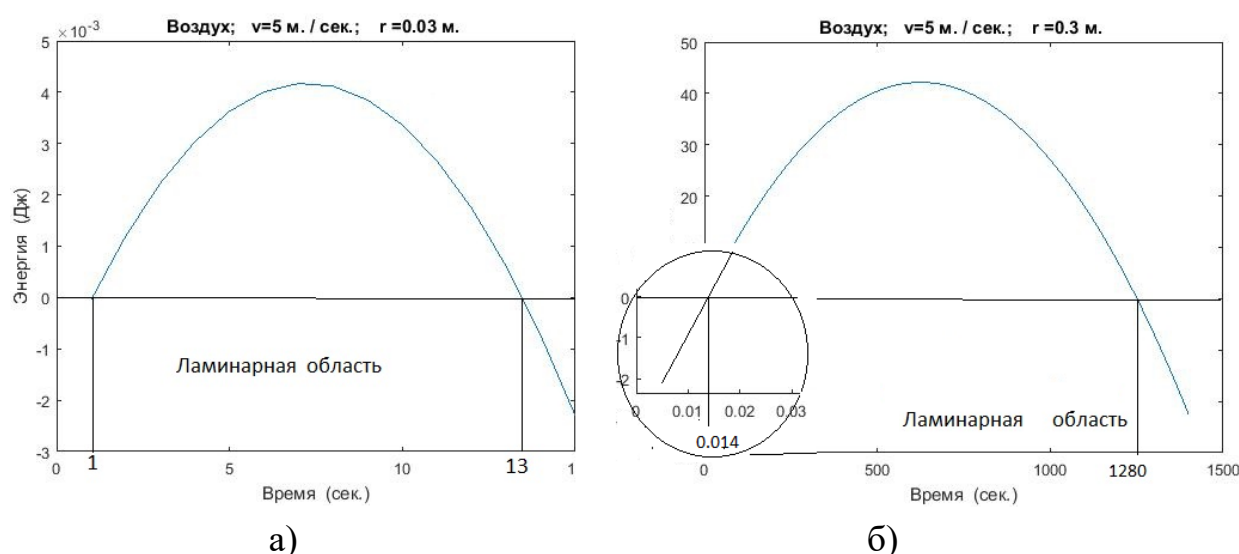


Рис. 5. Влияния времени на искривление струй: а) - $r = 0.03$ м.; б) - $r = 0.3$ м.;

Область положительных значений функции на графиках(рис. 5) соответствует искривленному состоянию струи.

Для искривления струи по радиусу r требуется энергия $1.56r^3$ (15). Такой уровень энергии перекрывается предшествующим ламинарным участком $0.3vtr^2$ (15). Когда t слишком мало, кинетической энергии ламинарного участка не хватает для искривления струи. Поэтому

искривление струи происходит с некоторой временной задержкой. Для струй радиуса $r = 0.03\text{м}$ задержка составляет 1 сек., а радиуса $r = 0.3\text{м}$ - 0.014 сек.(рис. 5).

С течением времени положительный баланс энергии искривленной струи увеличивается (левая восходящая часть кривых (рис. 5). Излишек энергии приводит к появлению изогнутых струй второго порядка малости в теле существующей изогнутой струи. В турбулентном потоке всегда наблюдаются мелкие вихревые структуры в теле более крупных структур.

По истечении некоторого времени наступает момент, когда отрицательная составляющая энергии вязкого трения, которая пропорциональна квадрату времени $-1.43\gamma vt^2$ (15), начинает оказывать существенное влияние. Возникает ниспадающая ветвь энергии(правая ветвь кривых графиков (рис. 5). В конечном итоге, через определенное время, изогнутая струя прекращает свое существование.

Изогнутая струя проходит три этапа существования: возникновение, развитие и угасание. За период существования искривленная струя многократно обходит замкнутый контур, образуя вихрь. Воздушный вихрь размером $r = 0.03\text{м}$ в скоростном потоке 5 м\сек . существует 12 сек., а вихрь размером $r = 0.3\text{м}$ более 20 мин. (рис. 5).

В турбулентном потоке постоянно возникают и распадаются вихри разных размеров. Хаотическое, и казалось бы абсолютно случайное турбулентное течение, на самом деле подчинено строгим законам сохранения и перераспределения энергии между различными формами движений. Струи потока образуют вихри, если кинетическая энергия искривленных струй оказывается ниже энергии прямых струй.

Энергия вихря предопределена величиной радиуса и скоростью вращения. Энергия вихря ниже, если меньше линейная скорость исходной прямой струи. Струя, обтекая тело притормаживается, теряя часть кинетической энергии. Если уровень потерь энергии приторможенной

струи укладывается в условие (1) наблюдаем турбулизацию пограничного слоя. Где $E_{\text{лам.}}$ - энергия набегающей струи, $E_{\text{турб.}}$ - энергия приторможенной струи. Струя, обтекая тело может образовать вихрь, оставаясь при этом ламинарной в свободном потоке.

Выводы. Турбулентность возникает, когда кинетическая энергия искривленных струй становится ниже кинетической энергии прямых струй.

Турбулентность возможна при соответствующем сочетании размеров струй, скорости, вязкости среды, масштаба времени.

Литература

1. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. Пер. с англ. под ред. Глушко Г.С. М.: Мир, 1974. 279 с.
2. Карман Т. "Турбулентность" УФН 21 21–59 (1939).
3. Хинце И. Турбулентность. Ее механизм и теория. Пер. Олег Яковлевский. Москва: Физматгиз, 1963.
4. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: ГИТТЛ. 1955. 519 с.
5. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1978. 944 с.
6. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: ГИТТЛ. 1955. 519 с.