

Исатаев М.С., Молдабекова Д.,
Омаралина А., Есеналиева А.,
Сейдулла Ж.К.

**Измерение аэродинамических
характеристик потока вблизи
поверхности тела**

Исследование аэродинамики плохо обтекаемых тел в потоках жидкостей и газов является одним из основных вопросов промышленной аэродинамики. К числу таких задач можно отнести и изучение поперечного обтекания стесненным потоком круглого цилиндра. Целью данной работы является исследование влияния числа Рейнольдса на закономерности течения в кормовой области цилиндра. Исследования проводились в интервале чисел $2 < Re < 2 \cdot 10^5$ и $0,7 < Pr < 550$. Проведенные эксперименты показали, что существенное влияние на аэродинамику при обтекании круглого цилиндра оказывает степень загромождения. При этом изменяются не только количественные характеристики, но и имеются ряд качественных изменений в режиме обтекания. Например, установлены две разновидности течения в следе за телом: первая характеризуется существованием периодических срывов вихрей при $q = 0,385$ и $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$ вторая – отсутствием периодичности, т.е. наличием беспорядочных вихревых течений при $q = 0,629$. При переходе течения в следе от периодического к аperiodическому длина зоны осредненного циркуляционного течения изменяется от $l/d = 1,5$ до $3,0$.

Ключевые слова: струя, аэродинамика, пограничный слой, поток, турбулентное течение, вихрь, идеальная жидкость.

Isatayev M.S., Moldabekova D.,
Omaralina A., Esenalieva A.,
Sejdulla Zh.K.

**Measurement of aerodynamic
characteristics fluxes near the
surface of the body**

Research of aerodynamics of bluff bodies in the flow of liquids and gases is one of the major issues of industrial aerodynamics. These problems can be attributed to the study of cross-flow constrained the flow of a circular cylinder. The objectives of this work investigation of the effect of the Reynolds number on the flow patterns in the aft area of the cylinder. The studies were conducted in the range of numbers $2 < Re < 2 \cdot 10^5$ and $0,7 < Pr < 550$. Experiments have shown that a significant impact on the aerodynamics of the flow around a circular cylinder has a degree of blockage. This changes not only the quantitative characteristics, but there are a number of qualitative changes in the flow regime. For example, set two kinds of flow in the wake of the body: the first is characterized by the existence of periodic vortex shedding at $q = 0,385$ and $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$ second - the lack of periodicity, ie, the presence of chaotic vortex flows at $q = 0,629$. When changing flow in the wake of the periodic to aperiodic length averaged circulation flow zone varies from $l/d = 1,5$ to $3,0$.

Key words: jet, aerodynamics, interface, stream, turbulent flow, whirlwind, ideal liquid.

Исатаев М.С., Молдабекова Д.,
Омаралина А., Есеналиева А.,
Сейдулла Ж.К.

**Дененің бетіне жақын ағынның
аэродинамикалық
сипаттамаларын зерттеу**

Аэродинамиканы зерттегенде орай ағатын денелердің сұйықтықтың және газдың тасқындарында бір индустриялық аэродинамиканың негізгі сұрақтарынан болып табылады. Домалақ цилиндрдың көлденең орай ағатын ағыншаның зерттеуін осындай мақсаттың санына апару болады. Бұл жұмыстың мақсаты цилиндрдің сырт жағындағы ағыс заңдылығына Рейнльдс санының әсерін зерттеу. Санның ара қашықтар $2 < Re < 2 \cdot 10^5$ және $0,7 < Pr < 550$ зерттеу жүргізілді. Эксперименттер дөңгелек цилиндр айналасында ағынының аэродинамикасын елеулі әсері қоршау дәрежесі бар екенін көрсетті. Бұл сандық сипаттамалары ғана емес, өзгереді, бірақ ағыны режимінде сапалы өзгерістер бар. Мысалы, дененің ізімен ағынының екі түрін орнатыңыз: бірінші $q = 0,385$ және $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$ кезінде қанға мерзімді құйынды болуымен сипатталады - кезеңділігі болмауы, яғни, ретсіз құйынды болуы $q = 0,629$ кезінде ағады. Тізбегіндегі ұзындығы мерзімді ізімен ағынын өзгерткен кезде айналымы ағыны аймағы $l/d = 1,5$ -ден $3,0$ -ге дейін өзгереді, орташа.

Түйін сөздер: ағынша, аэродинамика, шекаралық қабат, ағын, турбуленттік ағыс, құйындық, идеал сұйық.

**ИЗМЕРЕНИЕ АЭРО-
ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ПОТОКА ВБЛИЗИ
ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА****Распределение давления**

Рассмотрим экспериментальные результаты измерений распределения давления по поверхности круглого цилиндра при различных загромождениях. При каждом загромождении проводилось несколько измерений в зависимости от числа Рейнольдса. Измерения были проведены как с изменением диаметра цилиндра, так и при изменении ширины канала. Всего было проведено свыше 70 серий измерений. Приведены только некоторые данные, дающие ясное представление о зависимости распределения.

В лобовой точке цилиндра благодаря полному торможению набегающего потока $\bar{P}=1$. С удалением от этой точки коэффициент давления постепенно уменьшается и в области миделевого сечения наблюдается максимальное по абсолютной величине отрицательное давление. Положение минимума давления смещается от 70° до 90° при увеличении загромождения от 0 до $\sim 0,8$. За точкой минимума наблюдается некоторый рост давления до точки отрыва пограничного слоя, после которой оно остается постоянным. Точка отрыва пограничного слоя смещается от положения $\theta_{omp}=82^{\circ}$ при нулевом загромождении вниз по потоку до $\theta_{omp}=100^{\circ}$ при $\theta \geq 0,6$.

Таким образом, при докризисном режиме увеличение загромождения потока до $\theta \approx 0,9$ приводит к улучшению обтекания цилиндра и область безотрывного обтекания охватывает около 60% поверхности тела. Как установлено, распределение коэффициента давления практически не зависит от изменений числа Рейнольдса в пределах от $15 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^4$. Изменение геометрических размеров цилиндра и канала также не влияет на распределение давления при одном и том же загромождении [1].

В указанной области чисел Re и q не был обнаружен сверхкризисный режим обтекания цилиндра. Так как установка не позволяла получить более высокие значения числа Re , для получения сверхкризисного режима обтекания цилиндра производилась искусственная турбулизация набегающего потока.

Распределение коэффициента давления при обтекании цилиндра потоком с повышенным уровнем турбулентности для двух загромождений 0,385 и 0,629. Для удобства сравнения в обоих случаях измерения проделаны при одних и тех же значениях числа Re (одинаковые цифры соответствуют одному значению Re).

Как известно, наступление сверхкризисного режима связано с качественной перестройкой течения в кормовой области тела, благодаря которому точка отрыва пограничного слоя смещается вниз по направлению течения и происходит резкое увеличение давления в кормовой области тела. Изменение уровня турбулентности набегающего потока до 4,7% привело сверхкризисному режиму обтекания при значении числа $Re=235000$. Данные соответствуют докризисному режиму обтекания. Однако, трудно получить данные при одних и тех же значениях числа Re и уровня турбулентности. Поэтому было бы желательно ввести некоторый параметр, характеризующий однозначно влияние уровня турбулентности и числа Рейнольдса на закономерности обтекания цилиндра. Обработка результатов опытов показала, что таким параметром может служить произведение $\varepsilon' \cdot Re$ (где $\varepsilon' = \sqrt{U'^2}/U_\infty$), которое можно рассматривать как турбулентное число Рейнольдса: $Re_{Tu} = \sqrt{U'^2}/\nu$. Именно от этого параметра зависит положение точки отрыва пограничного слоя, и, следовательно, наступление кризисного режима обтекания. Анализ зависимости положения точки отрыва от параметра Re_{Tu} показал, что при некотором значении этого параметра положение точки отрыва резко смещается от $\theta \approx 100^\circ$ до $\theta \approx 140^\circ$, которое свидетельствует о наступлении кризисного режима обтекания.

За критическое значение турбулентного числа Рейнольдса примем условно его значение Re_{Tu}^* при котором $\theta_{отр} = 120^\circ$. А также $Re_{Tu}^* = 1060$ при $q=0,385$ и $Re_{Tu}^* = 1000$ при $q=0,629$. Приближенно можно считать, что критическое значение турбулентного числа Рейнольдса $Re_{Tu}^* = 1000$ и не зависит от загромождения канала до $q \leq 0,6$.

Зная уровень турбулентности потока, можно определить значение числа Рейнольдса, при котором наступает кризис обтекания, по зависимости

$$Re_{кр} \approx \frac{1000}{\varepsilon'} \quad (1)$$

Теперь вернемся к распределению давления при наличии решетки. В передней части цилиндра экспериментальные значения хорошо совпадают с расчетными значениями. Принимая минимальное значение в области $\theta \approx 80-85^\circ$, коэффициент давления затем растет до $130-140^\circ$, а дальше остается постоянным. В области $\theta \approx 100^\circ$ наблюдается перегиб, который характеризует переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный.

Таким образом при больших загромождениях в условиях кризисного режима обтекания примерно 80% поверхности тела омывается внешним безотрывным потоком.

После отрыва пограничного слоя от поверхности цилиндра в его кормовой части наблюдается постоянство коэффициента давления.

Также приведена зависимость среднего значения коэффициента давления в области циркуляционной зоны за цилиндром (или значение \bar{P} при $\theta=180^\circ$) от величины загромождения. Как видно с ростом загромождения растет и величина разрежения, особенно сильно при больших значениях q .

Коэффициент сопротивления

В исследуемой нами области чисел Рейнольдса $10^4 \div 2 \cdot 10^5$ по обтеканию цилиндра потоком воздуха в безграничном потоке значение коэффициента сопротивления $c_x \approx 1,2$. Однако, при обтекании тела в ограниченном потоке значение c_x изменяется и она становится функцией от загромождения.

Исходя из распределения давления по поверхности, были вычислены сопротивления цилиндра по формуле

$$c_x = \Delta\theta \sum_i \bar{P}_i \cos\theta_i, \quad (2)$$

где $\Delta\theta = 0,0873$ рад. соответствует измерениям через 5° по поверхности тела. При этом силами трения можно пренебречь, так как доля их весьма мала по сравнению с силами сопротивления давления для плохо обтекаемых тел. Как видно, с ростом загромождения коэффициент сопротивления цилиндра возрастает при $q < 0,5$ слабо, а при $q > 0,5$ весьма резко. Увеличение коэффициента сопротивления цилиндра в основном обусловлено понижением давления в кормовой области тела по сравнению с давлением невоз-

мушенного течения при больших загромождениях.

Нам приведены изменения коэффициента сопротивления давления при переходе режима обтекания от докритического к сверхкритическому для двух загромождений в зависимости от $Re_{Tu}c_x$ уменьшается начиная с некоторого значения Re_{Tu} , которое соответствует наступлению кризисного режима.

Для учета влияния загромождения при обтекании тел в канале в первом приближении можно рекомендовать в качестве характерной скорости потока скорость в наименьшем проходном сечении канала вместо средней скорости набегающего потока. Тогда формула, учитывающая влияние загромождения на коэффициент сопротивления, будет иметь вид:

$$c_x = c_{x_0} \frac{1}{(1-q)^2}, \quad (3)$$

где c_{x_0} – коэффициент сопротивления при обтекании безграничным потоком. Кривая соответствующая этой формуле, расходится с экспериментальными данными и может быть использована только для грубых расчетов.

Данные опытов хорошо описываются эмпирической формулой

$$c_x = c_{x_0} \left[1 + 0,717 \frac{q}{(1-q)^2} \right] \quad (4)$$

справедливой для значений $0 \leq q \leq 0,9$ и $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Турбулентная структура потока

Изучение структуры течения вблизи поверхности цилиндра было осуществлено термоанемометрическим методом исследования. Располагая нить насадки на 0,3 мм от поверхности цилиндра, измеряли среднюю скорость, интенсивность и частотный спектр турбулентных пульсаций скорости по периметру тела. Пульсации скорости отнесены к скорости набегающего потока. Большие пульсации скорости наблюдаются в областях малых значений скорости, т.е. в области отрыва пограничного слоя, где интенсивность турбулентности достигает ~60%. Кроме того, вся кормовая область характеризуется большими пульсациями. Значи-

тельность этого эффекта становится более заметной, если пульсации скорости отнести местной скорости потока.

Излучение распределения энергетического спектра частот привело к более глубокому анализу микроструктуры потока в циркуляционной области круглого цилиндра. Приведены изменения спектров частот по поверхности круглого цилиндра, где их нижняя линия соответствует нулевому уровню. Здесь квадратный корень от плотности спектральной функции $(F(w))^{1/2}$ и частота пульсаций скорости в логарифмическом масштабе. По спектральной функции $(F(w))^{1/2}$ было подсчитано локальное значение средней частоты колебаний потока по формуле:

$$w_{cp} = \frac{\sum_0^n (\sqrt{F(w_i)})^2 w_i \cdot \Delta w_i}{\sum_0^n (\sqrt{F(w_i)})^2 \cdot \Delta w_i}, \quad (5)$$

где Δw_i – полоса пропускания фильтра, а w_i – его резонансная частота.

Изменения средней частоты пульсаций по контуру тела при $U_\infty=5$ м/с, и при $U_\infty=20$ м/с. Отсюда видно, что с ростом загромождения потока средняя частота пульсаций увеличивается. Большие значения средней частоты приходятся на участок поверхности тела $105 < \theta < 130^\circ$. Необходимо подчеркнуть, что амплитуда изменения средней частоты по контуру тела при малых загромождениях незначительная по сравнению с амплитудой частоты при больших загромождениях. Зная местную скорость и среднюю частоту колебания, можно определить масштаб турбулентности. Масштаб турбулентности уменьшается с ростом загромождения потока. Если его значение при больших загромождениях составляет для задней критической точки ($\theta=180^\circ$) 7 мм, то при малом загромождении он равняется ~40мм. Область $105 < \theta < 130^\circ$ обладает мелкомасштабной турбулентностью, что протяженность ее по контуру увеличивается с ростом загромождения.

Таким образом, в исследуемой нами области чисел Рейнольдса и при вышеуказанных значениях загромождений в кормовой области тела наблюдаются пульсации скорости со средней частотой, изменяющейся от 20 до 1000 Гц. Большие изменения частоты происходят, в основном, в интервале $105 < \theta < 130^\circ$ по поверхности тела, для которой характерна мелкомасштабная

турбулентность. В области задней критической точки цилиндра при малых загромождениях имеет место ярко выраженная крупномасштабная турбулентность, достигающая размеров вихрей, срывающихся с поверхности тела.

Сравнение показывает, что средняя частота турбулентных пульсаций в кормовой области цилиндра вблизи $\theta \sim 180^\circ$ примерно в два раза выше частоты срыва периодических вихрей за телом при одной и той же скорости набегающего потока для $q=0,385$.

По-видимому это различие объясняется тем, что в кормовой области тела термоанемометр регистрирует вихри, сходящиеся с двух сторон тела. Следовательно, по средней частоте турбулентных пульсаций и масштабам турбулентности можно приблизительно судить о частоте и размерах срывающихся с поверхности тела вихрей.

Распределение скорости

Распределение скорости по периметру круглого цилиндра было получено различными методами. Значения скорости, измеренные термоанемометрами при расположении нити насадка на расстоянии 0,3 мм от поверхности цилиндра. Следует считать, что значения скорости представлены по абсолютной величине, так как термоанемометр не позволяет опреде-

лить направление потока. Поэтому необходимо учесть, что в области после точки срыва пограничного слоя скорости отрицательны из-за обратных направленных токов жидкости по отношению к направлению внешнего потока (что подтверждается результатам измерения с помощью трубки Пито). Можно заметить смещение точки отрыва пограничного слоя вниз по течению с ростом степени загромождения (рисунок 1).

С целью более глубокого изучения изменения скорости вблизи поверхности тела были поставлены опыты с Т-образной трубкой Пито. На рисунках 1-а и 1-б приведено распределение скоростей по сечениям пограничного слоя на поверхности цилиндра. Минимальное расстояние между поверхностью тела и центром трубки составляет 0,5 мм, так как внешний диаметр трубки 1 мм, а внутренний 0,3 мм. Поэтому измерения производились по существу по внешней части пограничного слоя. Измерения проведены при загромождениях $q=0,385$ и $0,629$ при скорости $U_\infty=20$ м/с. На рисунке указана линия нулевой скорости ($U=0$). Как видно из рисунков распределение скорости в сечениях до отрыва пограничного слоя более равномерное. С наступлением отрыва вблизи поверхности тела появляются частицы жидкости, движущиеся в обратном направлении по отношению к внешнему потоку.

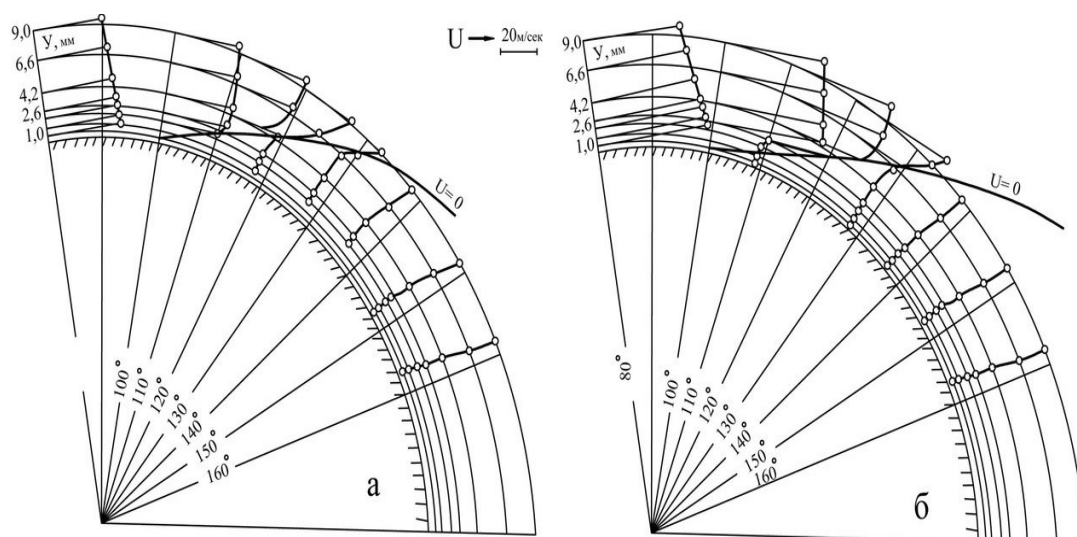


Рисунок 1 – Распределение средней скорости по поверхности цилиндра, измеренное Т – образной трубкой Пито: а) $q=0,385$; б) $q=0,629$

Необходимо подчеркнуть, что касательная к поверхности цилиндра скорость обратных токов жидкости при малых загромождениях ($q < 0,5$) больше, чем при значительных загромождениях ($q > 0,5$). На рисунке 1 приведены такие значения

скорости, подсчитанные по распределению давления для передней половины цилиндра. Как видно оба метода дают одинаковые значения скорости на передней половине цилиндра вне пограничного слоя.

Литература

1 Джунхан С. Влияние турбулентности и градиента давления набегающего потока на профиль скоростей в пограничном слое на плоской пластине и на теплопередачу (русский перевод). – 1991. – Том 89. – С. 97-121.

References

1 Dzhunhan S. Vlijanie turbulentnosti i gradienta davlenija nabegajushhego potoka na profil' skorostej v pograničnom sloe na ploskoj plastine i na teploperedachu (russkij perevod). // 89. (1991). 97-121.