

УДК 533.6/6.04: 621.9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА****¹Ильясова Г.О., ¹Алмабаева Н.М., ¹Адибаев Б.М., ¹Рысбекова А.Е., ²Исатаев М.С.**¹*Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы,
e-mail: yliyasova_gulzhan@mail.ru;*²*Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы*

В представленной статье определения влияния загромождения потока на аэродинамику течения и изучения картины течения вблизи поверхности круглого цилиндра. Также заключается экспериментальное исследование развития вихревой структуры струе, распространяющейся по выпуклой и вогнутой поверхности при наличии акустического воздействия. Установлено, что при воздействии с частотой, соответствующей акустическому резонансному воздействию в струе вдоль криволинейной поверхности интенсивность крупномасштабных вихрей растет, а при высокочастотном воздействии крупномасштабные вихри ослабляются. Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности. Это особенно заметно по изменению уровня турбулентности по длине струи вдоль линии максимума скорости. Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности. Из экспериментальных данных исследований турбулентных течений можно сделать вывод, что порожденные в каком-либо месте потока турбулентные пульсации не только сносятся по потоку, но и передаются по направлению нормали к линиям тока, причем не только непосредственно в соседние слои жидкости, но так же на значительное расстояние.

Ключевые слова: цилиндр, круглый цилиндр, турбулентный поток жидкости, интенсивности турбулентности, трубка Пито, турбулентное течение, ламинарное течения, турбулентный след

**DETERMINATION OF AERODYNAMIC FLOW PARAMETERS FOR TRANSVERSE
FLOW AROUND A CIRCULAR CYLINDER****¹Yliyasova G.O., ¹Almabayeva N.M., ¹Adibayev B.M., ¹Risbekova A.E., ²Isatayev M.S.**¹*Kazakh National Medical University named after S.D. Asfendiyarov, Almaty,
e-mail: yliyasova_gulzhan@mail.ru;*²*Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty*

In the presented article study definitions blocking flow on the aerodynamics of the flow and the study of the flow pattern near the surface of a circular cylinder. Also consists experimental research of the development of the vortex structure of a jet that propagates along a convex and concave surface in the presence of an acoustic action. It is established, when exposed to a frequency corresponding to acoustic resonant action in a stream along a curved surface, the intensity of large-scale vortices increases, and when high-frequency action large-scale vortices are attenuated. However, near the wall, the level of turbulence is higher in the jet on a convex surface than in a jet on a concave surface. This is particularly noticeable from a change in the level of turbulence along the length of the jet along the maximum velocity line. It can be seen that the intensity of turbulence in a jet on a convex surface continues to increase with distance from the nozzle and becomes much larger than in a jet along a flat surface. From the experimental data of studies of turbulent flows, it can be concluded that the turbulent pulsations generated at any place of the flow not only flow downstream, but also are transmitted along the direction of the normal to the streamlines, not only directly into adjacent layers of the liquid, but also to considerable distance.

Keywords: cylinder, round cylinder, turbulent fluid flow, turbulence intensity, Pitot tube, turbulent flow, laminar flow, turbulent trace

Большинство основных процессов химической технологии связано с движением жидкости в технологическом оборудовании. Ввиду чрезвычайной сложности процессов переноса, особенно при турбулентном гидродинамическом режиме, исследование закономерностей и механизма этих процессов осуществляют на простейших системах, для которых в принципе возможно экспериментальное и теоретическое определение количественных динамических и кинетических характеристик. Одной из наиболее распространенных простейших модельных систем такого рода является круглый цилиндр, обтекаемый в поперечном направ-

лении турбулентным потоком жидкости. Эта система, которая представляет собой типичный элемент для многих конструкций тепло и массообменной аппаратуры, в течение длительного времени является объектом для интенсивного теоретического и экспериментального исследования. Так, были получены точные решения гидродинамической, тепловой и диффузионной задач для окрестности передней критической точки, где реализуется течение в ламинарном пограничном слое с продольным градиентом скорости. Эти решения позволили аналитически определить профили скоростей и коэффициенты тепло и массопередачи

и послужили базой для установления ряда важных количественных закономерностей тепло и массоотдачи от цилиндра, обтекаемого турбулентным потоком жидкости или газа.

Исследование влияния загромождения потока на аэродинамику течения началось с изучения картины течения вблизи поверхности круглого цилиндра. Для этого использовались латунные и стальные (полые) цилиндры диаметром от 16 до 111 мм, длиной 150 мм. Оставляя ширину канала постоянной и изменяя диаметры цилиндров, получаем разные степени загромождения. Кроме того, были проведены измерения одним цилиндром при изменении ширины канала от 70 до 150 мм. Результаты опыта показали подобность картины при одних и тех же значениях загромождения и числа Рейнольдса.

Поверхность цилиндров тщательно полировалась. Для измерения распределения давления на поверхности цилиндров в их боковых стенках просверливались отверстия диаметром 0,3 мм.

Исследования распределения скорости, интенсивности турбулентности, а также изучение спектров частот вблизи поверхности тела проводилось с помощью электротермоанемометров ЭТАМ-3А и ЭТА-5А. Измерительной нитью служила вольфрамовая проволока диаметром 7 и 9 мк. Расстояние между ножками насадки 4, 5 мм. Такая длина рабочей части измерительной нити соответствует требованиям длина/диаметр ≥ 200 .

Совместно с аппаратурой ЭТАМ-3А и ЭТА-5А также были использованы: усилитель УИПП-2 и электростатический вольтметр 6–95 для измерения средне квадратичных значений пульсаций напряжения на концах измерительной нити; амперметр постоянного тока на 750 мА. Измерения спектра частот проводились 16-канальным частотным анализатором. Суть его заключалась в том, что каждый канал регистрировал колебания только определенной частоты в интервале от 20 до 9000 Гц. Например, 1 канал – колебания с частотой 20 Гц; 2 канал – 30 Гц; 3 канал – 45 Гц и т.д. Полоса пропускания фильтра каждого канала составляет 10% от частоты, на которую настроен фильтр. Турбулентные пульсации скорости визуально наблюдались с помощью осциллографа.

Для изучения закономерностей течения вблизи тела был использован цилиндр из латуни диаметром 58 мм. Внутри центральной части цилиндра был установлен координатник для изменения расстояния нити от поверхности тела. К текстолитовой катушке жестко закреплены два медных стержня диаметром 0,5 мм которые выходят из цилиндра

через фторопластовую шайбу. Шайба служит направляющей для стержней, а также изолирует их от цилиндра и его поверхность составляет как бы единое целое с поверхностью цилиндра. С другой же стороны в цилиндр ввинчивается металлическая пробка с отверстием в середине для прохода болта. Этот болт соединен с катушкой, где имеется резьба, свободный ход которой составляет 12 мм. Между пробкой и катушкой поставлена стальная пружина, которая создает возможность двигаться катушке как вниз, так и вверх при вращении болта. Вращая болт, перемещаем катушку вдоль направляющей пластины, которая одновременно препятствует повороту катушки вдоль оси. Головка болта вместе с диском также составляет как бы единое целое с поверхностью цилиндра. Полный оборот болта отодвигает нить от поверхности тела на 1 мм.

Таким образом, ввинчивая или вывинчивая болт, можно получить необходимое расстояние нити от поверхности тела. Распределение параметров потока по поверхности цилиндра можно снять, поворачивая его вокруг оси.

Между электрическим сопротивлением чистого металла и его температурой существует линейная зависимость:

$$R_{\omega} = R_g (1 + \beta t), \quad (1)$$

где R_{ω} – сопротивление при температуре t , R_g – сопротивление при 0°C , β – температурный коэффициент сопротивления металла (т.е. нити). Значение β – можно определить, проводя тарировку нити по температуре и $\beta = 0,0035$ 1/град.

В начале опыта, подавая к нити небольшой ток (не повышающий ее температуру) определялось значение R_g . Затем по формуле (1) рассчитывалось R_{ω} , соответствующее перегреву нити $\Delta t = 150^{\circ}\text{C}$. При этом перегреве снималась зависимость силы тока от скорости потока, и строился тарировочный график.

Уравнение тарировочной кривой можно записать в следующем виде [1].

$$\frac{I^2 R_{\omega}}{R_{\omega} - R_g} = A + B\sqrt{U}, \quad (2)$$

При методе постоянного тока пульсируют скорость и сопротивление есть $U = \bar{U} + u$ и $R_{\omega} = \bar{R}_{\omega} + r_{\omega}$, где u и r_{ω} , пульсирующие значения скорости и сопротивления анализируя (2) формулу U и R_{ω} получим:

$$\frac{U}{\bar{U}} = - \frac{2\bar{R}_{\omega}}{(\bar{R}_{\omega} - R_g)^2 B} \cdot \frac{I^2 r_{\omega}}{\sqrt{\bar{U}}}.$$

Учитывая, что произведение $I \cdot r_{\omega} = e$ есть пульсация напряжения на концах нити, имеем

$$\frac{U}{\bar{U}} = -\frac{2\bar{R}_{\omega}}{(\bar{R}_{\omega} - R_g)^2 B} \cdot \frac{Ie}{\sqrt{\bar{U}}}.$$

Для серии измерений

$$\frac{2\bar{R}_{\omega}}{(\bar{R}_{\omega} - R_g)^2 B} = \text{const} = C.$$

Тогда

$$\frac{U}{\bar{U}} = -C \cdot \frac{Ie}{\sqrt{\bar{U}}}. \quad (3)$$

Ряд последних измерений (при изучении следа) был получен методом постоянного сопротивления, который имеет преимущество перед методом постоянного тока в отношении точности измерения. В этом методе пульсируют ток и скорость, т.е. $I = \bar{I} + i$ и $U = \bar{U} + u$ тогда произведя дифференцирование уравнения (2) по U получаем

$$\frac{U}{\bar{U}} = -\frac{1}{(R_{\omega} - R_g) B} \cdot \frac{4Ie}{\sqrt{\bar{U}}}.$$

Для серии опытов, считая

$$\frac{4}{(R_{\omega} - R_g) B} = \text{const} = C',$$

имеем

$$\frac{U}{\bar{U}} = -C' \cdot \frac{Ie}{\sqrt{\bar{U}}}. \quad (4)$$

По значениям Ie (измеренным, непосредственно) и $\bar{U}$ (найденному из тарировочного графика), с помощью формул (3) и (4) определялись величины относительной интенсивности турбулентных пульсаций скорости. Ввиду загрязнения нити и для обеспечения более точного измерения, градуировка нити производилась перед и после каждого опыта. Отклонение градуировочных кривых друг от друга не превышало при этом 3–4 %.

Распределение кинетической энергии турбулентности по частотам (энергетический спектр) снималось с помощью многоканального частотного анализатора совместно с аппаратурой ЭТАМ-3 и ЭТА-5А. Выходные сигналы от анализатора подавались к осциллографу, откуда производилось фотографирование спектров частот.

Спектрограммы получаются в координатах $\sqrt{F(\omega)}$ и ω (ω – частота). Спектры

изображались в одном масштабе, поэтому интенсивность турбулентности полностью соответствовало изменению спектральной плотности напряжения $\sqrt{F(\omega)}$, отсюда определялась и средняя частота продольных пульсаций скорости.

Для измерения распределения средней скорости, по поверхности тела был сделан цилиндр. Вместо медных стержней вставлялись две трубки с наружным и внутренним диаметрами 1,0 и 0,3 мм. Концы трубок загибались в противоположные стороны (по направлению потока и навстречу ему) так, что отверстия их располагались на одной образующей, параллельной оси цилиндра. Другие концы трубок соединялись к одному микроманометру. Опыты показали удобность такого метода особенно для измерения в кормовой, области тела.

В турбулентном следе за телом снималось распределение скорости, интенсивности турбулентности и давления по сечениям канала, измерения по разным сечениям канала производились путем перемещения цилиндра диаметром 58 мм вдоль оси канала относительно измерительной трубки. Для измерения скорости и давления также применялась Т-образная трубка Пито, отверстия которой повернуты друг к другу на 180° и находились в плоскости, перпендикулярной оси канала. Такая трубка позволяет измерять статическое и динамическое давления на оси следа с достаточной точностью, несмотря на изменения статического давления и направление скорости потока. Подобная трубка применялась также при измерении скорости в следе за телом вдоль оси канала и при определении длины циркуляционной зоны. Перемещение трубки осуществлялось координатником, поставленным у выхода канала. Длиной зоны считалось, то место, где разность показаний труб равнялась нулю, т.е. где продольная составляющая набегающей скорости вдоль оси равна нулю. Несмотря на большие пульсации давления в следе, которая затрудняла точное определение длины зоны, данный метод оказался достаточно точным. Результаты, многократных независимых измерений длины циркуляционной зоны в следе дают одно и то же.

Для визуального исследования, рабочий участок установки помещался в поле зрения теневого пробора ИАБ-451 и поток струи воздуха подогревался в успокоительной камере до температуры (35÷40)°С с помощью сетки, по которой пропусклся ток от автотрансформатора. Для того чтобы выяснить влияние продольной кривизны на вихревую структуру была визуально исследована струя, распространяющаяся вдоль выпу-

клой и вогнутой цилиндрической поверхностей при значениях начального параметра кривизны $S_R=(\pm 0,036); (\pm 0,056); (\pm 0,094)$, как без воздействия, так и с наложением акустического воздействия, при начальной скорости $v_0=2,8$ м/с. Из анализа визуальной картины течения видно, что при движении по вогнутой поверхности, из-за воздействия центробежной силы струя становится уже, область ламинарного течения становится больше, а при движении вдоль выпуклой поверхности наблюдается обратная картина.

Установлено, что при воздействии с частотой, соответствующей акустическому резонансному воздействию для струи вдоль пластины, в струе вдоль криволинейной поверхности интенсивность крупномасштабных вихрей также растет, а при высокочастотном воздействии крупно масштабные вихри ослабевают.

С ростом начальной скорости струи длины начального ламинарного участка уменьшается, дискретные вихри становятся менее интенсивными. Переход в турбулентное течение на выпуклой поверхности начинается раньше, чем на вогнутой поверхности.

Из анализа видно, что распределение уровня турбулентности по сечению струи качественно такое же как и в струе вдоль плоской пластины. Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности. Это особенно заметно по изменению уровня турбулентности по длине струи вдоль линии максимума скорости. Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности.

Результаты измерений уровня турбулентности по сечению пристенной струи, распространяющейся вдоль выпуклой и вогнутой цилиндрической поверхностей показывают что распределение уровня турбулентности

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{v'^2}}{v}.$$

по сечению струи качественно такое же, как в струе вдоль плоской пластины.

Это обусловлено влиянием центробежных сил на устойчивость течения в струе. Причем в струе на выпуклой поверхности

центробежные силы должны способствовать подавлению турбулентности в пристенном слое и интенсифицировать их во внешней струйной части пограничного слоя. Так как во внешнем струйном пограничном слое интенсивность турбулентности гораздо выше, чем во внутреннем пограничном слое, то в целом вся струя становится высоко турбулентной.

В струе на вогнутой поверхности центробежные силы способствуют подавлению турбулентности в струйном пограничном слое и интенсификация турбулентности в пристенном пограничном слое. Очевидно, на развитие турбулентности в струе на криволинейной поверхности безусловное влияние оказывает также появление продольных вихревых течений, которые могут также влиять на распределение осредненных скоростей.

Из экспериментальных данных исследований турбулентных течений можно сделать вывод, что порожденные в каком-либо месте потока турбулентные пульсации не только сносятся по потоку (конвективный перенос), но и передаются по направлению нормали к линиям тока, причем не только непосредственно в соседние слои жидкости (диффузия), но так, же на значительное расстояние [2].

Наиболее ярко эффект дальнего действия турбулентности проявляется в следующих известных фактах:

- а) значительные пульсации, возникающие в ядре постоянной скорости начального участка струи;
- б) шум турбулентной струи;
- в) пульсации давления и скорости внутри ламинарного подслоя и на стенке при наличии турбулентного пограничного слоя;
- г) деформация границ трехмерной струи;
- д) повышение турбулентности на фронте пламени и т.д.

Список литературы

1. Хинце И.О. Турбулентность / пер. с англ. – М.: Госиздательство физ-мат., 1963.
2. Абрамович Г.Н., Гиршович Г.А., Крашенинников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М., 1984. – 720 с.
3. Исатаев С.И., Ползик В.В., Толеуов Г., Бердибаев М.С., Исатаев М.С., Наубетжанов М. Экспериментальное исследование аэродинамики плоской струи, ограниченной торцовыми стенками и трехмерной струи // Международная научная конференция: Проблемы турбулентности, тепломассопереноса и горения, посвященная 70-летию профессора Исатаева Совета Исатаевича. Казахстан. – Алматы, 2002. – С. 27–28.