

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА АЭРОДИНАМИКУ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА С ЦИКЛОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Канд. техн. наук, доц. ЛЕУХИН Ю. Л.,
засл. деят. науки и техн. России, докт. техн. наук, проф. САБУРОВ Э. Н.,
инж. СКАЧКОВ А. С., докт., проф. ГАРЕН В., инж. ТИДЕКЕН С.

*Архангельский государственный технический университет,
Университет прикладных наук, г. Эмден (Германия)*

Исследование аэродинамики кольцевого канала выполнено на стенде (рис. 1). Основными его элементами являются кольцевой канал 1 и генератор закрутки потока – циклонная камера 2. Канал длиной $l = 1840$ мм образован стеклянными трубами с внутренним диаметром $d_1 = 2r_1 = 105$ мм и наружным $d_2 = 2r_2 = 140$ мм. Безразмерная длина кольцевого канала $\bar{l} = l/d_3$ ($d_3 = d_2 - d_1$ – эквивалентный диаметр) равняется 52,6. Генератор закрутки – полый гладкостенный цилиндр с внутренним диаметром $D = 179$ мм и длиной $L = 118$ мм – выполнен из оргстекла. Подвод воздуха в генератор осуществляется тангенциально его внутренней поверхности с двух диаметрально противоположных сторон через входные каналы 3 высотой $h_{вх} = 13$ мм и длиной $l_{вх} = 40$ мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D^2$ равняется $4,13 \cdot 10^{-2}$. Изменение расхода воздуха осуществляется варьированием числа оборотов воздухоудвки 4 с помощью электронного блока управления 5.

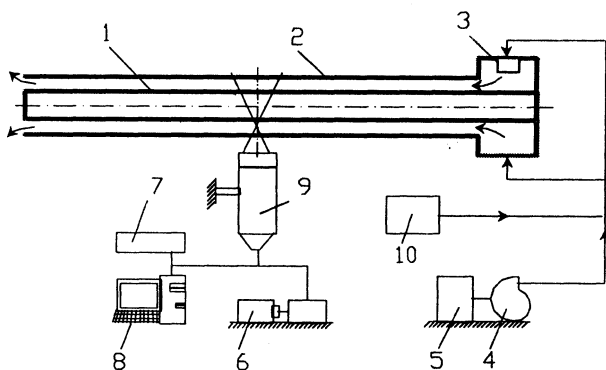


Рис. 1. Принципиальная схема аэродинамического стенда

Поля осредненных и пульсационных скоростей в кольцевом канале изучали с помощью двухлучевого лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) фирмы Dantec Measurement Technology A/S. Источником лазерного излучения служил Ar-лазер 6 с длиной луча $\lambda = 457 \dots 514,5$ нм. Геометрические размеры точки измерений в направлении оси канала составили 0,047 мм, радиуса – 0,58 мм. Первичная обработка сигнала ЛДА производилась контроллером-счетчиком BSA 7 фирмы Dantec Measurement Technology A/S, окончательная обработка и представление результатов измере-

ния осуществлялись на персональном компьютере 8 с помощью прикладной программы «Burst Ware», обеспечение которой позволяет вести контроль за перемещением оптического зонда 9, устанавливать и изменять основные рабочие настройки контроллера BSA, производить измерения вектора скорости потока в данной точке и его пульсационную составляющую. При измерениях в воздушный поток вводили микроскопические частицы, движущиеся со скоростью потока, и плотностью, близкой к плотности воздуха. Такие частицы диаметром порядка 1 мкм производились генератором тумана «Safex Fog Generator 2001» 10 фирмы Dantec.

Опыты проводились при значениях числа Рейнольдса $Re = 770 \dots 10,9 \times 10^3$ ($Re = V_{cp}/d_3 v$, V_{cp} – средняя в кольцевом канале скорость воздуха; v – коэффициент кинематической вязкости).

На рис. 2 представлены распределения безразмерных тангенциальной $\bar{w}_\phi = w_\phi/V_{cp}$ и осевой $\bar{w}_z = w_z/V_{cp}$ составляющих вектора скорости по относительному радиусу $\bar{r} = r/r_2$ кольцевого канала при различных числах Рейнольдса в сечениях $\bar{z} = 12,26$ и $47,31$ ($\bar{z} = z/d_3$ – безразмерная продольная координата, отсчитываемая от начала кольцевого канала вдоль его оси по направлению движения потока). Анализ опытных данных показал, что снижение интенсивности вращательного движения потока, уменьшение локальных значений относительной максимальной тангенциальной скорости $\bar{w}_{\phi m} = w_{\phi m}/V_{cp}$ происходит не только с увеличением продольной координаты \bar{z} , но также и с уменьшением значения числа Re . Изменяются распределения безразмерных тангенциальной и осевой составляющих скорости. Причем наиболее существенно – первые из них.

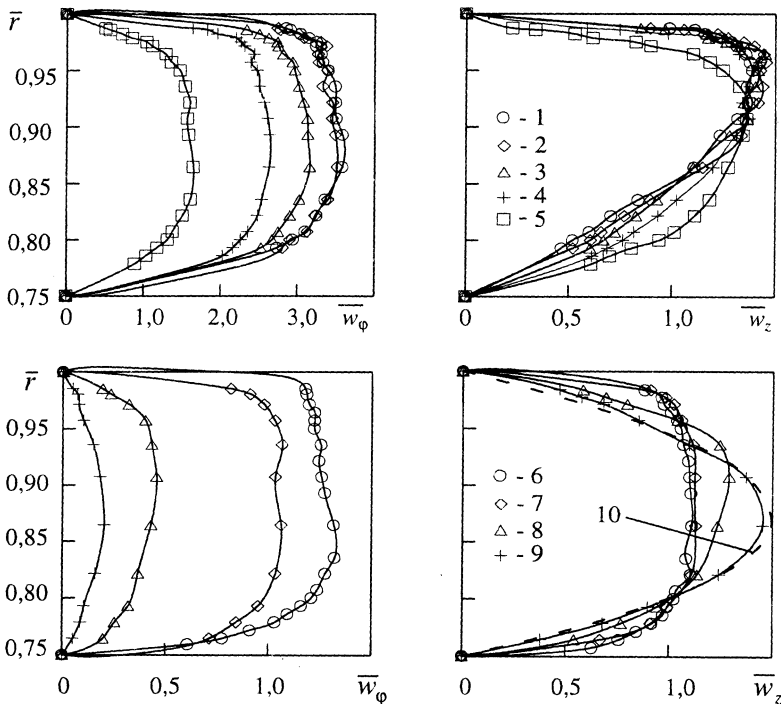


Рис. 2. Распределения \bar{w}_ϕ и \bar{w}_z в кольцевом канале при различных значениях числа Re : 1 – $Re \cdot 10^{-3} = 9,77$; 2 – $7,12$; 3 – $5,46$; 4 – $3,33$; 5 – $0,97$ при $\bar{z} = 12,26$; 6 – $Re \cdot 10^{-3} = 8,81$; 7 – $4,86$; 8 – $1,51$; 9 – $0,77$ при $\bar{z} = 47,31$; 10 – расчет по уравнению (4)

Для каждого сечения кольцевого канала можно определить число Рейнольдса $Re_{авт}$, больше которого распределения \bar{w}_φ и \bar{w}_z практически не зависят от его величины и определяются только геометрическими характеристиками генератора закрутки, кольцевого канала и значением продольной координаты z . При $Re < Re_{авт}$ они существенно зависят еще и от числа Рейнольдса. По мере затухания вращательного движения в канале граница автомодельной области распределений \bar{w}_φ и \bar{w}_z смещается в сторону больших значений Re .

Граница автомодельного режима для распределений тангенциальной и осевой составляющих скорости для любого сечения канала может быть определена по уравнению

$$Re_{авт} = (\bar{w}_{\varphi m}^{авт})^{0,35} \cdot 10^4, \quad (1)$$

где $\bar{w}_{\varphi m}^{авт}$ – значение максимальной тангенциальной скорости для автомодельного распределения составляющих скорости в кольцевом канале [1].

Максимальное значение тангенциальной составляющей скорости в рассматриваемых диапазонах изменения геометрических характеристик кольцевого канала и чисел Re , как и в циклонных камерах [2], является важнейшей динамической характеристикой потока.

Изменение $\bar{w}_{\varphi m}$ в зависимости от числа Рейнольдса в различных сечениях кольцевого канала представлено на рис. 3. Линия 4 определяет границу автомодельной области течения и построена по уравнению (1).

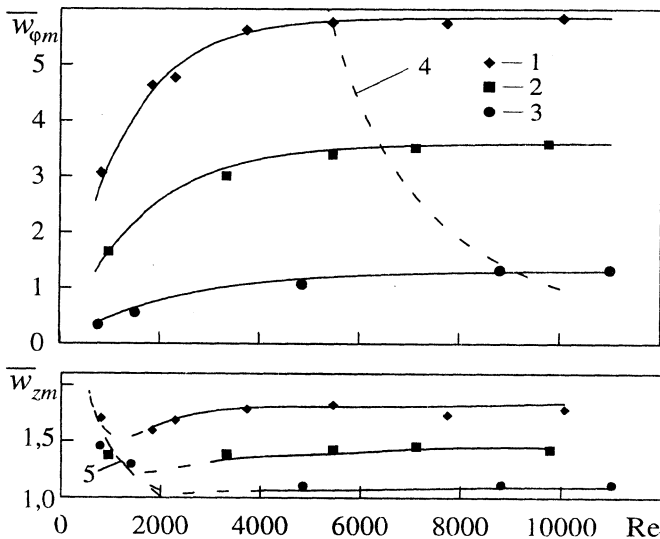


Рис. 3. Зависимость $\bar{w}_{\varphi m}$ и \bar{w}_{zm} от числа Re в различных сечениях кольцевого канала: 1 – $z = 2,26$; 2 – $12,26$; 3 – $47,31$; 4 – расчет по (1); 5 – по (3) и (5)

При $Re < Re_{авт}$ для нахождения $\bar{w}_{\varphi m}$ значение $\bar{w}_{\varphi m}^{авт}$ должно быть умножено на поправочный коэффициент, учитывающий влияние числа Рейнольдса:

$$k_{Re} = 1 - \exp\left(-4,2 \frac{Re}{Re_{авт}}\right). \quad (2)$$

На рис. 3 также показана зависимость максимальной осевой скорости $\bar{w}_{zm} = w_{zm}/V_{cp}$ от числа Re в различных сечениях кольцевого канала. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям $w_{\phi m}$ и w_{zm} по уравнениям (1)–(3)

$$\bar{w}_{zm} = 1 + 0,056 \bar{w}_{\phi m}^{1,62}. \quad (3)$$

Следует отметить, что, начиная с определенного для каждого сечения числа Re , профиль осевой скорости становится менее заполненным в результате постепенного перехода к ламинарному режиму течения. Так, при $Re = 770$ в сечении $z = 47,31$ распределение w_z практически совпадает с профилем скорости при осевом ламинарном течении потока в кольцевом канале (линия 10 рис. 2), которое определяется уравнением [3]

$$\bar{w}_z = 2 \frac{(1 - \bar{r}^2) \ln \bar{r}_1 - (1 - \bar{r}_1^2) \ln \bar{r}}{(1 + \bar{r}_1^2) \ln \bar{r}_1 + (1 - \bar{r}_1^2)}, \quad (4)$$

где $\bar{r}_1 = r_1/r_2$.

Полученные результаты подтверждают вывод о том, что в закрученных потоках граница между ламинарным и турбулентным режимами течения, характеризуемая критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$, смещается в область его меньших значений [4]. С ростом $w_{\phi m}$ область существования турбулентного режима в кольцевом канале увеличивается за счет уменьшения $Re_{кр}$.

Для приближенного определения верхней границы $Re_{кр}$ можно использовать уравнение

$$Re_{кр} = \left[5 + 0,07 \left(\bar{w}_{\phi m}^{авт}\right)^{2,5}\right]^{-1} \cdot 10^4. \quad (5)$$

На рис. 3 линия 5 соответствует уравнениям (3) и (5).

Сопоставление (1), (5) показывает, что $Re_{авт}$ и $Re_{кр}$ можно связать соотношением

$$Re_{кр} = \left[5 + 0,07 \left(Re_{авт} \cdot 10^{-4}\right)^{-7,14}\right] \cdot 10^4. \quad (6)$$

Расчет радиусов $r_{\phi m}$ и r_{zm} , характеризующих положение соответственно $w_{\phi m}$ и w_{zm} при $Re \geq Re_{кр}$, с удовлетворительной точностью можно выполнять по уравнениям, рекомендуемым для автотельного распределения тангенциальной и осевой составляющих полной скорости:

$$\frac{\eta_{\phi m}}{\eta_{zm}^0} = 2,82 - 2,65 \left(\bar{w}_{\phi m}\right)^{-0,5}; \quad (7)$$

$$\frac{\eta_{zm}}{\eta_{zm}^0} = 2,44 - 1,23(\bar{w}_{\varphi m})^{-0,5}, \quad (8)$$

где $\eta_{\varphi m} = (r_{\varphi m} - r_1)/(r_2 - r_1)$; $\eta_{zm} = (r_{zm} - r_1)/(r_2 - r_1)$; $\eta_{zm}^0 = (r_{zm}^0 - r_1)/(r_2 - r_1)$; η_{zm}^0 и r_{zm}^0 – безразмерный и размерный радиусы, характеризующие положение максимума скорости при осевом течении в кольцевом канале, определяемые по рекомендациям [5–7].

С затуханием вращательного движения, при увеличении \bar{z} и уменьшении числа Рейнольдса происходит изменение предельных углов закрутки потока на стенках канала β_1 и β_2 . Взаимосвязь между тангенсами этих углов и $\bar{w}_{\varphi m}$, определенная для условий автомодельного течения [1], справедлива также и для неавтомодельного и соответствует уравнениям:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \bar{w}_{\varphi m} (1,53 - 0,26 \bar{w}_{\varphi m})^{-1}; \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = 5,23 \left[1 + \exp(0,27 - 0,71 \bar{w}_{\varphi m}) \right]^{-1} - 2,27. \quad (10)$$

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние числа Рейнольдса на аэродинамику кольцевого канала с циклонным генератором закрутки потока.
2. Приведенные в статье уравнения и рекомендации могут быть использованы в аэродинамических расчетах кольцевых каналов теплообменных устройств с закрученным течением теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование гидродинамики кольцевого канала с закрученным течением теплоносителя / Ю. Л. Леухин, А. С. Скачков, Э. Н. Сабуров и др. // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тр. XIII школы-семинара молодых ученых и спец. под рук. акад. РАН А. И. Леонтьева. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – Т. 2. – С. 345–348.
2. Сабуров Э. Н., Карпов С. В. Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Э. Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2000. – 568 с.
3. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 411 с.
4. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
5. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
6. Brington J. A., Jones J. B. Fully developed turbulent flow in annuli. Trans / ASME, ser. D, Journal of Basis Engineering, 1964. – V. 86, № 4. – P. 835–844.
7. Rothfus R. R., Sartory W. K., Kermode R. J. Flow in concentric annul at high Reynolds numbers. – AIChE Journal, 1966. – V. 12, № 6. – P. 1086–1091.

Представлена кафедрой
теплотехники

Поступила 30.12.2002