

## Л и т е р а т у р а

1. Х а л а т о в А.А., Щ у к и н В.К., Л е т я г и н В.Г. Локальные и интегральные параметры закрученного течения в длинной трубе. - Инженерно-физический журнал, 33, 1977, № 2, с. 224-232.
2. Х а л а т о в А.А., Щ у к и н В.К., К о ж е в н и к о в А.В. Закон трения и формпараметры закрученного течения в цилиндрическом канале. - Изв. вузов. Авиационная техника, 1977, № 3, с. 98-105.

УДК 532.551

В.В.Найденко, В.В.Жизняков

### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ С ЗАКРУТКОЙ НА ВХОДЕ

#### П р и н я т ы е о б о з н а ч е н и я

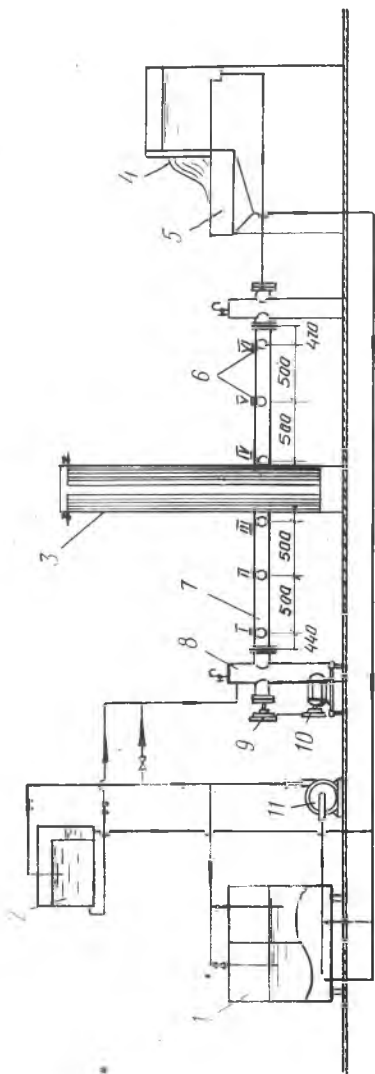
$D, R$  - диаметр и радиус трубопровода;  $\bar{z} = z/D$  - относительная длина трубопровода;  $Re_d = U_0 D / \nu$  - число Рейнольдса;  $\theta = M / KR$  - параметр крутки;  $M = 2\pi \int_0^R \rho U_z U_\varphi r^2 dr$  - момент количества движения;  $K = 2\pi \int_0^R \rho U_z^2 r dr$  - количество движения;  $\gamma, \rho$  - удельный вес и плотность;  $U_z = \sqrt{U_z^2 + U_\varphi^2 + U_r^2}$  - суммарная (полная) скорость;  $U_z, U_\varphi, U_r$  - аксиальная, тангенциальная и радиальная составляющая вектора скорости;  $r$  - текущий радиус;  $U_0 = 4Q / \pi D^2$  - среднерасходная скорость;  $Q$  - объемный расход;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $E = 2\pi \int_0^R (\rho + \rho U_z^2 / 2) U_z r dr$  - энергия;  $p$  - статическое давление;  $H = E / \gamma Q$  - гидродинамический напор;  $r_{o.m}$  - радиус зоны обратного тока жидкости;  $\omega = \pi n / 30$  - угловая скорость;

$$\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_{\beta x}}; \bar{M} = \frac{M}{M_{\beta x}}; \bar{E} = \frac{E}{E_{\beta x}}; \bar{H} = \frac{H}{H_{\beta x}};$$

$$\bar{U}_z = \frac{U_z}{U_0}; \bar{U}_\varphi = \frac{U_\varphi}{U_0}; \bar{r}_{\varphi \max} = \frac{r_{\varphi \max}}{R}; \bar{r}_{o.m} = \frac{r_{o.m}}{R}.$$

#### И н д е к с ы

$\beta x$  - условия на входе;  $\max$  - максимальное значение;  $w$  - условия на стенке.



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - бак исходной жидкости; 2 - напорный бак с переливным устройством; 3 - пьезометра; 4 - водостлив сложного профиля; 5 - приемная камера; 6 - штуцера для ввода датчиков; 7 - исследуемый участок трубы; 8 - ускорительные трубочатые колонны; 9 - шкив; 10 - привод вертушки; 11 - насос ЗКМ-6

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований движения закрученного потока воды в стальных горизонтальных трубопроводах диаметрами 78, 106 и 150 мм. Схема опытной установки приведена на рис. 1. Длина исследуемых участков труб составляла 17,9-35,5 калибров, диапазон изменения числа Рейнольдса от  $1,25 \cdot 10^4$  до  $1,35 \cdot 10^5$ . Закрутка потока осуществлялась 4-лопастными вертушками с прямыми, взаимно перпендикулярными, непрофилированными лопастями, помещенными в начале исследуемых трубопроводов. Скорость вращения вертушек изменялась от 300 до 900 об/мин. В качестве измерительных датчиков использовались шаровые зонды диаметром 8 мм.

Методика проведения замеров и нахождения величин скоростей и давлений изложена в [1].

На основе обработки большого числа опытных данных можно отметить следующее.

1. Одной из основных величин, влияющих на

структуру потока и дающих представление о степени закрученности потока, является параметр крутки  $\theta$ . Он находится из уравнения [2]

$$\theta = \frac{M}{KR}$$

В процессе работы величина  $\theta$  изменялась от 0,1 до 3,3.

Полагая, что у лопастей вертушки тангенциальная составляющая скорости  $U_\varphi$  изменяется по закону твердого тела ( $U_\varphi = \omega r$ ), а аксиальная составляющая скорость  $U_z$  равна среднерасходной ( $U_z = U_0$ ), можно найти теоретическую интенсивность крутки на входе в трубу:

$$\theta_{\theta x}^T = \frac{\omega R}{2U_0} \quad (1)$$

Связь между действительными и теоретическими значениями интенсивности крутки на входе в цилиндрический канал записывается в виде

$$\theta_{\theta x} = 0,8 \theta_{\theta x}^T 0,48 \quad (2)$$

2. Изменение тангенциальных составляющих скоростей  $U_\varphi$  в радиальном направлении у оси трубопровода близко к закону квазитвердого вращения ( $U_\varphi r^{-1} = const$ ), а у стенок канала - к закону квазипотенциального течения ( $U_\varphi r = const$ ).  $U_\varphi$  меняются по кривым с максимумами, положение которых различно при разных значениях  $\theta$ . Для определения максимальных значений относительных тангенциальных составляющих скоростей и их положения найдены следующие степенные зависимости:

$$\bar{U}_{\varphi max} = 1,95 \theta^{1,09} \quad (3)$$

$$\bar{r}_{\varphi max} = 0,67 \theta^{0,31}, \text{ для } \theta \geq 0,1 \quad (4)$$

При значениях  $\theta < 0,15$  профили изменения  $U_\varphi$  не имеют четко выраженных максимумов. Предельное значение  $\bar{r}_{\varphi max} = 0,33$ .

3. Величины относительных максимальных аксиальных составляющих скоростей в сечениях трубопроводов определяются по уравнению

$$\bar{U}_{z max} = 1,35 \theta^{0,67} \text{ при } \theta \geq 0,75, \quad (5)$$

для  $\theta < 0,75$   $\bar{U}_{z \max} = \text{const} = 1,1$ .

При достижении некоторой величины интенсивности крутки у оси трубопроводов отмечалось появление зоны обратных токов жидкости, относительная величина которой

$$\bar{r}_{o.m} = 0,336 (\theta - 0,95)^{0,69}. \quad (6)$$

Длина зоны обратных токов имела протяженность до 22 калибров.

4. Для определения величины среднего статического давления в сечениях трубопроводов была получена зависимость

$$\bar{p} = p_w (0,97 + 0,07 \theta). \quad (7)$$

5. При нахождении величины гидродинамического напора на лопастях вертушки получили следующее уравнение:

$$\frac{H_{\theta x}}{H_o} = 0,93 + 0,132 \theta_{\theta x}, \quad (8)$$

где  $H_o$  - гидродинамический напор на лопастях вертушки незакрученного потока.

Формула (8) действительна для  $3,3 \geq \theta \geq 0,5$ .

При интенсивности крутки менее 0,5 гидродинамический напор закрученного потока на входе равен напору незакрученного потока, т.е.  $H_{\theta x} / H_o = 1$ .

6. Изменение относительных величин интенсивности крутки, момента количества движения, энергии и гидродинамического напора по длине трубопровода носит экспоненциальный характер и хорошо описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\theta} &= \exp(-a \bar{z}); \\ \bar{M} &= \exp(-k \bar{z}); \\ \bar{E} &= \exp(-c \bar{z}); \\ \bar{H} &= \exp(-d \bar{z}); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $a = 2,36 \cdot 10^{-2} \theta_{\theta x}^{1,19}$ ;  $d = 0,19 \theta_{\theta x}^{0,81}$ ;

$\{k = 8,8 \cdot 10^{-5} \theta_{\theta x}^{1,88}, c = 1,34 \cdot 10^{-2} \theta_{\theta x}^{1,11}\}$  при  $Re = (1,4 \div 3,09) \cdot 10^4$ ;

$\{k = 9,12 \cdot 10^{-4} \theta_{\theta x}^{1,26}, c = 4,3 \cdot 10^{-2} \theta_{\theta x}^{1,34}\}$  при  $Re = (0,5 \div 1,2) \cdot 10^5$ .

Полученные зависимости позволяют сделать вывод об универсальном характере параметра крутки  $\theta$

### Л и т е р а т у р а

1. П о в х И.Л. Аэродинамика: Руководство к лабораторным работам. - Л.: 1962, с. 62-67.
2. Аэродинамика закрученной струи. Под ред. Р.Б.Ахмедова. - М.: Энергия, 1977, 239 с.

УДК 532.516:532.517.4

В.К.Щукин, А.А.Халатов, А.В.Кожевников,  
В.Г.Летягин

### МИКРОСТРУКТУРА ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ПРОНИЦАЕМОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию микроструктуры закрученного течения в открытой пористой трубе диаметром 80 мм и длиной 13,75 калибра при однородном вдуве. В качестве основного и вдуваемого газа использовался осушенный и очищенный атмосферный воздух. Исследование проводилось при  $Re_d = 10^5$  в трех сечениях  $\bar{x} = l/R = 3,06; 5,76; 8,46$  по длине трубы и при четырех значениях параметра вдува  $B_* = \frac{(\rho V)w}{\rho_0 w_{kr}} = 0; 0,0033; 0,0066; 0,01$ . Начальная закрутка потока осуществлялась лопаточными завихрителями с центральным телом. Конструктивный угол закрутки лопаток по их высоте изменялся по степенному закону  $tg \varphi = tg \varphi_n \left(\frac{R}{r}\right)^2$  ( $\varphi_n$  - угол закрутки на наружном радиусе). В опытах использовались завихрители, основные параметры которых изменялись в пределах:  $\varphi_n = 45-60^\circ$ ,  $n = 1-3$ . Доводочные испытания показали, что экспериментальный канал удовлетворяет условиям технической гладкости. Измерение полей скоростей и турбулентных характеристик потока проводилось с помощью двух термоанемометров постоянной температуры Т7Н. Степень турбулентности закрученного потока определялась с помощью методики, применяемой в осевых потоках и известной как "метод трех положений нити". При этом сначала определялся угол за-