

Р.З.Алимов, В.М.Исламов, В.И.Лукьянов,  
Ю.И.Осипенко

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ  
ПОСТУПАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНО ДВИЖУЩИХСЯ ПОТОКОВ

В настоящее время в различных областях науки и техники используются закрученные или поступательно-вращательно движущиеся потоки с различной степенью закрутки. Однако пока отсутствует единый метод оценки степени закрутки таких потоков, что существенно затрудняет проведение сопоставления, сравнительного анализа, оптимизации известной информации по вихревому эффекту.

Применительно к тангенциальным завихрителям центробежных фронсунок Г.Н.Абрамовичем была предложена так называемая геометрическая характеристика

$$A = RR_m / nr_0^2, \quad (1)$$

получающаяся в результате решения уравнений движения и сплошности с учетом особенностей данного типа генератора закрутки. Этот критерий можно рассматривать как условие кинематического подобия поступательно-вращательно движущихся в диафрагмированной трубе потоков. Для полуограниченной недиафрагмированной трубы этот параметр принимает следующий, более удобный вид:

$$A_r = F_r / F_s, \quad (2)$$

а для одноканальных циклонных камер - форму [1]

$$a\delta / d^2. \quad (3)$$

Одной из наиболее существенных особенностей закрученных потоков является наличие в поле их течения массовых, центробежных сил, интенсивность которых определяется степенью закрутки и которые оказывают определенное влияние на характер течения и переноса. Это положение учитывается критериями кинематического и динамического подобия типа Дин  $De = Re\sqrt{d/D}$ , Тейлора  $T_a = \frac{U_c d}{\nu} \sqrt{\delta/R}$ , Чукина  $K = \frac{\Delta F \rho}{\rho U_\varphi^2}$  и их различными модификациями [2].

При поступательно-вращательном движении или движении жидкости по спирали происходит удлинение траекторий струек по сравнению со случаем обычного осевого движения, что учитывается эффективным критерием Рейнольдса, определяемым согласно соотношению

$$Re_{\phi} = Re \left( 1 + \frac{U_{\phi}^2}{U_x^2} \right). \quad (4)$$

В ряде экспериментальных работ степень закрутки потока оценивается просто углом наклона лопаток завихрителя и характером изменения этого параметра по радиусу трубы, в случае винтовых, ленточных, шнековых завихрителей – значением относительного шага винтовой линии, по которой скручены эти элементы [2].

Имеются отдельные попытки использовать для оценки степени закрутки такие параметры, как  $U_{\phi}^2/U_x^2$ ,  $L_x R/L_{\phi}$ ,  $U_{\phi} R/a^* r_i$  и т.д.

В последнее время все чаще появляются работы, в которых для оценки степени закрутки как свободных струй, так и потоков, протекающих в трубах, используется критерий, представляющий отношение момента количества движения потоков относительно его оси  $M$  к осевому количеству движения  $L$  в масштабе радиуса струи или трубы  $R$ , т.е.

$$A_{\kappa} = M/LR, \quad (5)$$

или различные модификации этого критерия, например в виде числа Россби

$$Ro = \frac{Q_e \ell}{\Gamma_x R} \quad \text{или} \quad Ro = \frac{\rho d M}{\Gamma} \quad (6)$$

Анализ результатов некоторых теоретических исследований, посвященных изучению гидродинамики закрученных потоков и струй, позволяет получить некоторые сведения о роли параметров  $L$  и  $M$  и безразмерной их комбинации  $M/LR$ .

В работе [3] уравнение движения закрученного потока в тангенциальном направлении приводится к следующему виду:

$$\Gamma \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi} = Ro \cdot \Phi[\Psi(\eta, \xi, N, \gamma)], \quad (7)$$

где  $\eta = r^2/R^2$ ;  $\xi = x/\ell$ ;  $\Gamma = \Gamma_r/\Gamma_{\infty}$ ;  $\Gamma_r = 2\pi U_{\phi} r$ ;  $\Gamma_{\infty} = 2\pi U_{\phi} R$ ;

$\Psi$  – функция тока;  $N = Q_e/\gamma$ ;  $\gamma = (R/\ell)^2$ ;  $Q_e$  – объемный расход.

Приведенный результат показывает, что темп затухания закрут-

ки  $\partial \Gamma / \partial \xi$  наряду с геометрическими факторами, объединяемыми функцией  $\Phi$ , однозначно определяется число Россби.

Л.Г. Лойцянский для описания хода затухания тангенциальной скорости свободной закрученной струи получил выражение [4]

$$U_{\varphi} = \frac{\alpha \eta \gamma}{\left(1 + \frac{1}{4} \alpha^2 \eta^2 \gamma^2\right)^2}, \quad (8)$$

где использованы обозначения:  $\alpha = \sqrt{\frac{3L_0}{16\mu}}$ ;  $\eta = \frac{r}{x\sqrt{y}}$ ;  $\gamma = \frac{M\sqrt{PL}}{\mu^2}$ .

Нетрудно убедиться в том, что практически  $1/4 \alpha^2 \eta^2 \gamma^2 \gg 1$ . Тогда имеем

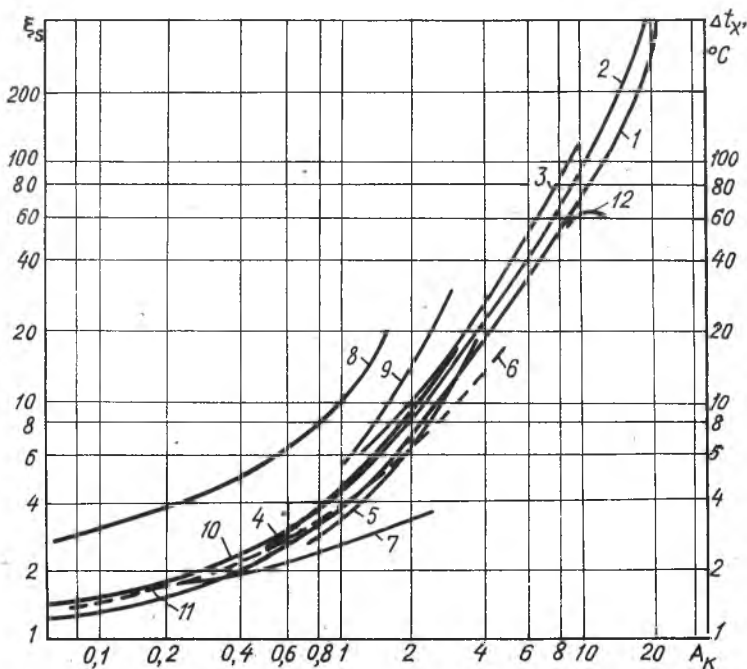
$$U_{\varphi} = \frac{\gamma}{\alpha^3 \eta^3 \gamma^2} = \frac{M}{L} \Phi(x, y, r). \quad (9)$$

Полученное решение также свидетельствует об определяющей роли отношения  $M/L$  в описании картины затухания закрутки свободной струи. О степени достоверности такого заключения позволяют судить данные, приведенные на рис. 1 и 2.

На рис. 1 приведены для различных типов завихрителей известные данные по полному напору на входе в масштабе среднерасходного скоростного напора в зависимости от параметра крутки  $A_K$ . Обработка проведена применительно к трубам с относительной длиной порядка 15, как наиболее оптимальным с точки зрения влияния затухания закрутки и локального эффекта, связанного с конструктивными особенностями данного типа завихрителя. Значения параметра  $A_K$  для известных типов локальных завихрителей оценены по формулам, приводимым в работе [1].

Приведенные данные показывают, что для всех типов завихрителей характерен рост полного напора на входе в вихревую трубу по мере возрастания степени крутки, оцениваемой параметром  $A_K$ . При этом кривые для различных типов завихрителей имеют тенденцию сгруппировываться около расчетной зависимости 1, получаемой по известной методике и учитывающей лишь компоненты напора, идущие на создание тангенциальной, осевой составляющих скорости потока и центробежного давления. Здесь же приведены известные данные по вихревому эффекту в виде зависимости эффективности температурного разделения от  $A_K$  [5].

На рис. 2 представлена известная информация по интенсифи-



Р и с. 1. Зависимость полного напора на входе в вихревую трубу и эффективности температурного разделения от степени закрутки потока:  $Re = 2 \cdot 10^4$ ;  $z/d = 15$ ; расчетные кривые - 1, 2; кривые, характеризующие завихрители: тангенциальный, тангенциально-удиточный [I] - 3, 4; тангенциально-лопаточный [I] - 6; аксиально-лопаточный [I, 2] - 7; ленточный [2] - 10, 11; шнек [2] - 9; зависимость эффективности температурного разделения от  $A_k$  - 12

кации теплообмена в закрученных потоках в зависимости от параметра  $A_k$ .

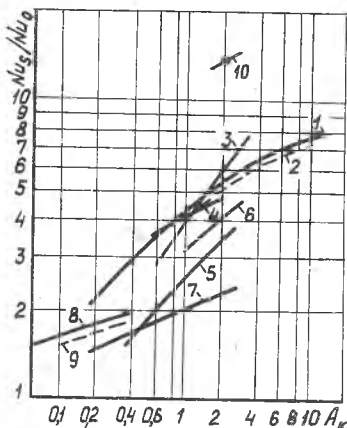
Интенсивность теплообмена для всех типов завихрителей возрастает по мере роста степени закрутки потока. Этот рост медленнее протекает для лопаточных завихрителей, что согласуется с данными по сопротивлению и объясняется, по всей вероятности, недозакруткой

до расчетного значения  $A_k$  потока, выходящего из завихрителя. Для остальных типов завихрителей рост интенсивности теплообмена в зависимости от  $A_k$  качественно протекает примерно одинаково.

Проведенный анализ дает основание считать, что параметром  $A_k$  наиболее полно выражаются основные особенности закрученных потоков независимо от способа их генерации.

#### Л и т е р а т у р а

1. А х м е д о в Р.Б. Дутьевые газогорелочные устройства. - М.: Недра, 1974.
2. Щ у к и н В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - М.: Машиностроение, 1970.
3. Д е й ч М.Е. Техническая газодинамика. - М.: Энергия, 1974.
4. Л о й ц я н с к и й Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: ГИТТЛ, 1957.
5. М е р к у л о в А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.



Р и с. 2. Зависимость отношения критерия Нуссельта для закрученного и осевого потоков от степени закрутки потока:  $l/d = 15$ ; кривые, характеризующие завихрители: тангенциальный (Алимов Р.З., Ермолин В.К., Хей и Вест, Новиков И.И.)-1,2,3,4; локальный винтовой (Нарежный Э.Г.)-5; аксиально-лопатоочный - 7; ленточный ([2], Мигай В.К.)-8,9; аксиально-лопатоочный (Делягин Г.Н) - 10; шнек - 6