

03

©1994

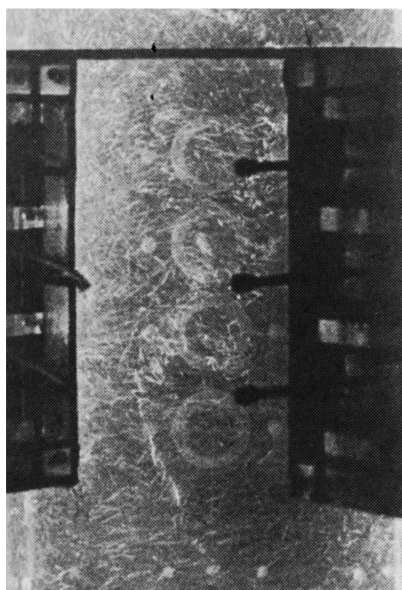
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ С ВИНТОВОЙ СИММЕТРИЕЙ

*С.В.Алексеевко, П.А.Куйбин,
В.Л.Ожолов, С.И.Шторк*

Для описания интенсивности закрутки потока широкое распространение получил параметр закрутки потока S . Такое название естественной характеристики вращающихся потоков, отражающей отношение средней тангенциальной скорости в закрученной струе к значению средней осевой скорости, можно найти, например, в [1]. Дальнейшее развитие теории закрученных потоков привело к введению эквивалентных в некотором смысле определений данного параметра [2,3]. В настоящее время широкое распространение получило его определение через отношение осевой компоненты потока момента количества движения к произведению осевой компоненты потока количества движения на характерный размер [4].

Однако дальнейшие многочисленные экспериментальные исследования закрученных потоков, в том числе и авторов данной работы (см., например, [5]), показали, что ни одно из упомянутых определений интенсивности закрутки не является удовлетворительной характеристикой, однозначно определяющей картину течения. Действительно, на модельной установке, описанной в [5], были зафиксированы различные режимы течения при одинаковых значениях параметра закрутки S (рис. 1, а-г). Для всех четырех зафиксированных режимов одинаковые значения параметра S обеспечивались использованием одного закручивающего устройства и одинаковым количеством подаваемой через него жидкости (погрешность в определении расхода не превышала 1.0%).

На фотографии (рис. 1, а) представлена визуализация течения, которому соответствует прецессирующий вихрь винтовой формы. Аналогичную, но уже неподвижную винтовую структуру удастся наблюдать при наличии на выходе из камеры диафрагмы с отверстием, смещенным от оси канала (рис. 1, б). Центральное расположение отверстия в диафрагме дает вихревую нить с прямолинейным ядром (рис. 1, в). Изменение геометрии глухого торца в последнем случае (переход от плоского дна к двускатному) дает

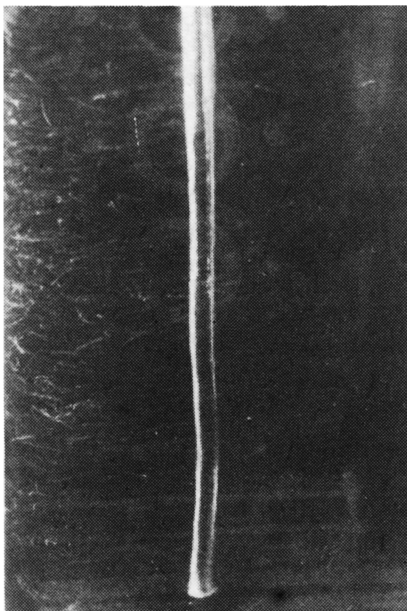


а



б

Рис. 1. Реализация различных режимов трения при значениях расхода $Q = 8$ л/с и закрутки потока $S = 2.9$.



8



2

Рис. 1 (продолжение).

две винтовые вихревые нити (рис. 1, з). На фотографиях оси вихрей видны за счет скопления пузырьков воздуха, которыми производилась визуализация течения. Анализ представленных данных показывает, что при одинаковых значениях расхода и закрутки потока могут реализовываться различные режимы закрученных течений, отличающиеся по форме вихревой структуры (прямолинейная и винтовая), по их количеству (одиночная и двойная), по характеру их движения (неподвижная и прецессирующая — вращающаяся с постоянной угловой скоростью), по их характерному размеру — шагу винта. Таким образом, параметр закрутки потока не только не позволяет отличить выявленные разные картины закрученных течений, но и не описывает точно даже его винтовую структуру. Действительно, из представленных фотографий видно, что во всех четырех случаях винтовая структура потока имеет различный шаг винта в осевом направлении, хотя определяющий его угол закрутки потока — $\arctg(S)$ во всех случаях одинаков.

Снять это противоречие возможно лишь введением нового параметра, характеризующего закрученные потоки. В частном случае, когда структура потока обладает правой винтовой симметрией с шагом $2\pi l$ по оси Oz , за такую величину естественно принять l (в случае левой винтовой симметрии значение l следует считать отрицательным). Как показано в [6], для таких течений осевая v_z и тангенциальная v_θ компоненты скорости связаны соотношением

$$v_z + \frac{r}{l} v_\theta \equiv \text{const}, \quad \text{или} \quad v_z = v_0 - \frac{r}{l} v_\theta, \quad (1)$$

где r, θ, z — цилиндрические координаты с осью Oz , направленной по оси симметрии потока; v_0 — значение осевой компоненты скорости на оси потока, которое определяет наличие однородного потока. Укажем, что ранее параметр l как интегральная характеристика закрученных потоков уже использовался, но только для случая $v_0=0$ (см., например, [7]). В этом случае учитывая, что для течения с винтовой симметрией осевые компоненты потоков количества движения J и момента количества движения L имеют вид

$$J = \rho \int v_z^2 r dr d\theta \quad \text{и} \quad L = \rho \int v_\theta v_z r^2 dr d\theta, \quad (2)$$

и, используя (1), получим $L = L/J \equiv -aS$, т.е. шаг винта полностью характеризуется параметром крутки S и характерным размером a — “эффektivным” радиусом сопла. Если на оси симметрии потока осевая компонента скорости не равна нулю, что наиболее часто встречается в экспери-

менте, то после подстановки (1) в (2) для определения l получим соотношение:

$$lJ = v_0 lQ - L, \quad \text{или} \quad l = -aS/(1 - v_0 Q/J), \quad (3)$$

где Q — массовый расход. Таким образом, в произвольном закрученном течении с винтовой симметрией шаг винта не пропорционален параметру закрутки потока, а существенно зависит от значения скорости течения на его оси симметрии, определяющей однородный поток. Только предположение, что на значение v_0 существенно влияют граничные условия, по-видимому, и объясняет различный шаг винтовых вихрей, наблюдаемый в экспериментах (рис. 1).

Однако следует отметить, что в реальных потоках условие винтовой симметрии по всей длине оси Oz , как правило, не выполняется. Действительно, по мере удаления от закручивающего устройства поток претерпевает существенные изменения — вплоть до полного затухания закрутки. Предположение о винтовой симметрии предполагает одинаковую структуру потока с периодичностью $2\pi l$ по оси Oz на всем ее бесконечном протяжении. Поэтому применительно к реальным закрученным течениям гипотезу о винтовой симметрии разумно применять лишь локально — в каждом сечении потока, перпендикулярном его си. Это будет означать, что в каждом сечении осевая и тангенциальная компоненты скорости локально должны удовлетворять соотношению (1). Входящие в него параметры l и v_0 предполагается считать новыми характеристиками закрученных течений.

Для проверки гипотезы о локальной винтовой симметрии в исследованных течениях сопоставим измеренный в эксперименте профиль осевой скорости со скоростью v_z , пересчитанной по формуле (1), — через измеренные значения тангенциальной скорости. Измерения проводились для двух режимов, показанных на рис. 1, а, в. Причем из-за наличия прецессирующего вихря на режиме 1, а формула (1) применялась к осредненным значениям скоростей. За локальную характеристику течения v_0 в данном сечении взято значение осевой компоненты скорости при $r = 0$. Для расчета параметра l , определяющего шаг винта, использовалось соотношение $l = M/(v_0 - V)$, которое получается после интегрирования (1) по сечению, перпендикулярному оси потока. Здесь через V обозначена средняя осевая скорость, а через M — средняя осевая компонента количества движения.

Результаты проведенного сопоставления представлены на рис. 2, а для режима 1, а и на рис. 2, б и в для режима 1, в при двух его реализациях с разными диафрагмами: диаметром 70 и 100 мм. Расчетные значения параметра l в этих случаях соответственно имели значения: $-75, 26, 50$, а значения v_0 : $-0.09, 1.36, 0.74$. Отметим, что измеренная

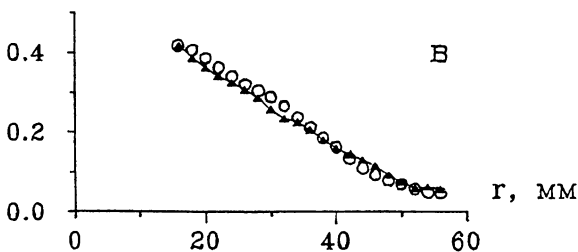
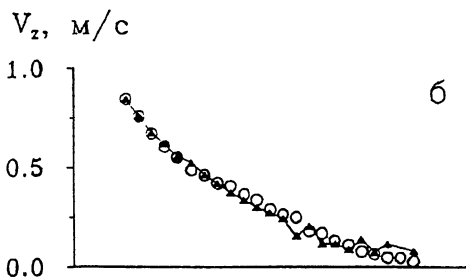
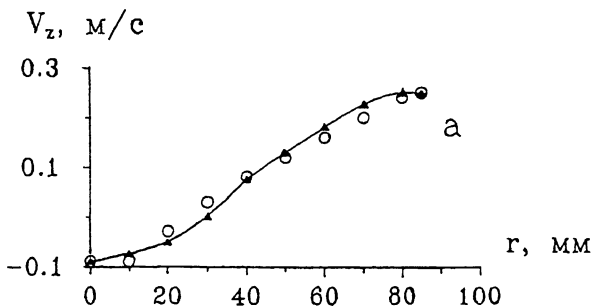


Рис. 2. Проверка гипотезы о локальной винтовой симметрии в закрученном потоке.

v_z (кружки на рисунке) и пересчитанная (треугольники) через тангенциальную скорость по формуле (1) различаются в пределах ошибки измерения. Это указывает на существование винтовой симметрии в закрученных потоках, которая проявляется даже в устройствах с квадратным поперечным сечением, исследованном в нашей работе. Причем, как это следует из данных представленных на рис. 1, разным режимам соответствуют различные значения параметра l , характеризующего шаг винтовой симметрии потока — своеобразной меры интенсивности закрутки течения.

Таким образом, путем воссоздания разной структуры закрученного течения при одинаковых его интегральных ха-

рактических (параметра закрутки и расхода) в работе обоснована необходимость и введена новая интегральная характеристика интенсивности закрутки, которая определяет шаг винтовой симметрии потока.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ N 94-02-05812-а.

Список литературы

- [1] *Абрамович Г.Н.* и др. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
- [2] *Cassidy J.J., Falvey H.T.* // J. Fluid Mech. 1970. V. 41. Pt. 4. P. 727-736.
- [3] *Faler J.H., Leibovich S.* // Phys. Fluids. 1977. V. 20. N 5. P. 1385-1400.
- [4] *Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.* Swirl Flow. Abacus Press. 1984.
- [5] *Alekseenko S.V., Shtork S.I.* // Russian J. of Engineering Thermophysics. 1992. V. 2. P. 231-265.
- [6] *Окулов В.Л.* Резонансные гидроакустические процессы в проточной части машин и агрегатов с интенсивной закруткой потока: Дис. доктора физ.-мат. наук. Новосибирск, ИТ СО РАН, 1993, 288 с.
- [7] *Fanelli M.* // J. of Hydraulic Research. 1989. V. 27. N 6. P. 769-807.

Институт теплофизики СО РАН
Новосибирск

Поступило в Редакцию
1 июня 1994 г.