

С. И. ИСАТАЕВ, Г. ТОЛЕУОВ, М. С. ИСАТАЕВ, К. А. ЕСЕНАЛИНА, Ш. БОЛЫСБЕКОВА

(НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУР В СВОБОДНОЙ СТРУЕ

Аннотация

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании когерентной структуры турбулентности в трехмерной струе. Было установлено, что в струйных течениях первоначально возникшие вихри не могут распадаться на более мелкие, а попарно взаимодействуя друг с другом и сливаясь, образуют большой конгломерат вихрей, сохраняющих свою индивидуальность примерно до затухания струи по направлению течения. Экспериментально нами доказано, что максимальная частота турбулентных пульсаций не превышает частоту первичных крупномасштабных вихрей, образованных на начальном участке струйного течения.

Ключевые слова: плоская свободная струя, крупномасштабные вихри, турбулентность, распределение скорости и температуры, дальнобойность.

Кілт сөздер: жазық еркін ағынша, ірі масштабты құйындар, турбуленттік, жылдамдықтың және темп-ратураның таралуы, алысқа ұру.

Keywords: flat free jet, large-scale vortices, turbulence, velocity and temperature, range.

Экспериментальными исследованиями последних лет [1, 2] было замечено, что при истечении струи из сопла прямоугольного сечения развиваются профили скорости и температуры с резкими неравномерностями, несмотря на то, что в выходном сечении сопла профили скорости и температуры были равномерными. Исследования показали [2, 3], что эти неравномерности обусловлены влиянием структуры крупномасштабных вихрей, развивающихся в начальном участке струи. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования динамики крупномасштабных вихрей и их дальнобойности вниз по течению.

Эксперименты проводились на установке, схематично показанной на рисунке. Воздух от вентилятора (1) поступал через виброгасящий переход (2) в успокоительную камеру (3), затем через сетки (4) и (5) истекал из сопла (6) с прямоугольной формой выходного сечения.

Корневая часть струи располагалась в рабочей части теневого прибора ИАБ-451, оборудо-ванного так, что можно было наблюдать теневую мгновенную картину течения.

Воздействие на струю осуществлялось с помощью динамика (7) мощностью 50 Вт, размещенного в успокоительной камере фронтально к выходному сечению струи. При подаче на динамик синусоидального сигнала из звукового генератора (17) в выходном сечении струи создаются синусоидальные колебания скорости выбранной частоты.

Для измерения средней скорости и динамического давления применялась трубка Пито (8) и микроанометр (12) марки ММН-240.

Пульсации скорости измерялись двухканальной термоанемометрической системой (14) с линеаризованным выходным сигналом скорости. Термоанемометр был соединен с осциллографом. Осциллограмма пульсаций скорости записывались на экране запоминающего осциллографа СВ-13 (18) при заданной скорости развертки сигнала.

Перемещение трубки Пито и датчиков по трем осям симметрии сопла осуществлялось с помощью трехмерного координатника.

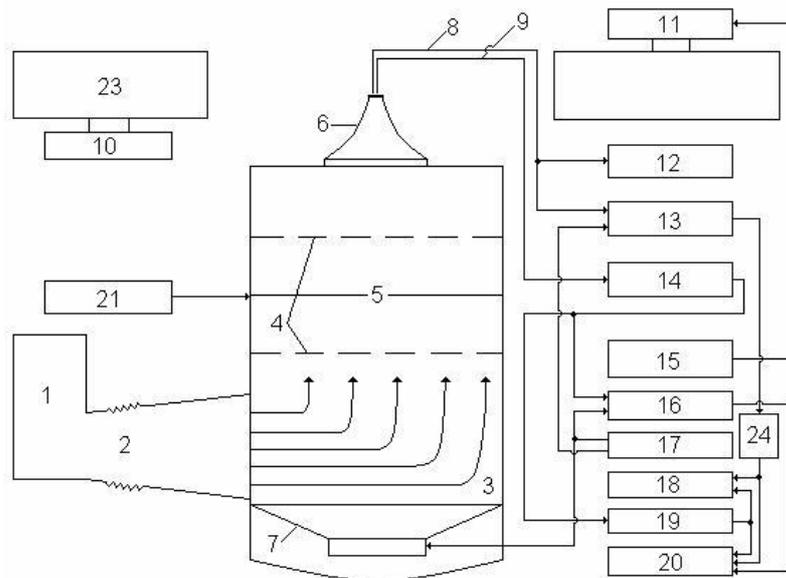


Схема экспериментальной установки:

- 1 – вентилятор; 2 – виброгасящий переход; 3 – успокоительная камера; 4 – выравнивающие сетки; 5 – нагреваемая сетка; 6 – сопло; 7 – динамик ($N = 50$ Вт); 8 – трубка Пито; 9 – датчик; 10 – фоторегистратор; 11 – осветитель; 12 – микроанометр марки ММН-300; 13 – индуктивный преобразователь давления; 14 – система термоанемометрического блока типа СТМ-02; 15 – стробоскоп; 16 – блок фазовой выборки БЭВ-03; 17 – звуковой генератор ГЗ-34; 18 – осциллограф универсальный запоминающий СВ-13; 19 – прибор для исследования корреляционных характеристик Х6-4; 20 – потенциометр двухкоординатный ПДП4-002; 21 – автотрансформатор типа ЛАТР; 22 – торцовые пластины; 23 – теневой прибор Теплера ИАБ-451; 24 – дифференциальный усилитель.

Для формирования трехмерных струй использовались сменные сопла с различными удлинениями. Удлинением сопла называют отношение длины a , к ширине b выходного среза сопла ($\lambda = a/b$).

Спрофилированные по формуле Витошинского четыре стороны сопла сначала монтировались друг другу специальными зажимами, затем тщательно пропаивались. Прямоугольные сопла имели одинаковую длину 90 мм, со степенями поджатия $c \approx 10$ ($c = F_1/F_2$, где F_1 – площадь входного сечения конфузора; F_2 – площадь выходного сечения конфузора), причем значения площадей среза выхода для всех сопел были примерно одинаковы и равновелики по площади круглому соплу, диаметр которого составлял бы $d_{кр} = 22,57$ мм. В соответствии с этим эффективный диаметр каждого прямоугольного сопла $d_э$ был приблизительно таким же, как диаметр круглого сопла.

Здесь $d_э = 2\sqrt{ab/\pi}$.

В опытах использовались сопла с соотношением сторон: $\lambda = 3$; 11; 16 и 25,25 и квадратное сопло для анализа осциллограмм развертки сигнала мгновенных пульсаций скорости.

Основные измерения проведены при скорости истечения из сопла $U_0 = 20$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $Re = 3,25 \cdot 10^4$, рассчитанного по эффективному диаметру.

В работе [2] показано, что при измерении профилей скорости для $\lambda=11$ вдоль направления большой оси z в переходном участке в профилях скорости наблюдается «седлообразность» формы их распределения. С дальнейшим увеличением значений параметра λ в поперечных профилях скорости по этой же оси число максимумов также увеличивается (например, для $\lambda=16$ число максимумов равно 3, а для $\lambda=25$ это число составляет 5).

Эти результаты, как показывает визуальное исследование с помощью теневого прибора, в основном связаны с возникновением и дальнейшим развитием замкнутых крупномасштабных вихрей, динамика которых зависит от параметра λ .

Действительно, визуальным наблюдением с помощью оптических приборов картины истечения из сопла подогретой струи установлено, что в зоне смешения турбулентной струи образуются периодические крупномасштабные вихри, которые с удалением от среза сопла непрерывно деформируются.

Результаты показывают, что неравномерности, которые появляются в профилях скорости, сохраняются до начала основного участка. Можно предположить, что, если природу возникновения таких неравномерностей связать с динамикой крупномасштабных вихрей, тогда такие крупные образования тоже должны сохранить свою индивидуальность на большие расстояния.

В работе [1] представлены результаты измерений осевой скорости U_m в струях, истекающих из сопел с различной величиной λ , при скорости истечения $U_0 = 20$ м/с.

Анализ данных показывает, что с ростом λ происходит постепенное изменение длины начального и переходного участков. С увеличением λ более четко выделяется участок течения, в которой темп убывания скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Она располагается между участком, где скорость изменяется как в плоской струе ($U_m/U_0 \sim x^{-0,5}$) и участком, на котором скорость убывает как в осесимметричной струе ($U_m/U_0 \sim x^{-1}$). Как и в предыдущем случае с неравномерностью в поперечном (ось z) профиле скорости, и в данном случае образованный участок простирается до начала основного участка. Можно предположить, что возникновение этого эффекта тоже связан с динамикой крупномасштабных вихрей и их дальностью.

В настоящее время установлено, что при высокой степени поджатия сопла на выходе из сопла практически всегда получается ламинарное течение. После выхода из сопла в свободной границе смешения потока течение неустойчиво и образуются когерентные дискретные вихри, в процессе дальнейшего развития которых устанавливается развитое турбулентное течение струи. До последнего времени считалось, что в результате взаимодействия друг с другом и благодаря силам трения первоначальные вихри распадаются на более мелкие. Число их непрерывно растет и в конечном итоге устанавливается развитое турбулентное течение с мелкомасштабными вихрями с частотами намного большими, чем частоты первоначально образовавшихся вихрей.

Однако результаты исследований последних лет показали, что это не совсем верно. Было установлено, что в струйных течениях первоначально возникшие вихри не могут распадаться на более мелкие, а попарно взаимодействуя друг с другом и сливаясь, образуют большой конгломерат вихрей, который может состоять из 10 и более первичных вихрей, сохраняющих свою индивидуальность в составе конгломерата до расстояний более 100 калибров по направлению течения. Экспериментально нами доказано, что максимальная частота турбулентных пульсаций не превышает частоту первичных крупномасштабных вихрей, образованных на начальном участке струйного течения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Исатаев С.И., Тарасов С.Б., Толеуов Г. Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, распространяющихся из сопел с прямоугольным выходным сечением // Вестник КазГУ. Серия физическая. – № 2. – Алматы, 1995. – С. 71-74.
- 2 Исатаев С.И., Толеуов Г., Исатаев М.С. Экспериментальное исследование турбулентной свободной струи, истекающей из сопла с прямоугольным выходным сечением // Вестник КазНУ. Серия физическая. – № 1(32). – Алматы, 2010. – С. 15-22.
- 3 Исатаев М.С. Влияние крупномасштабных вихрей на профили скорости и температуры свободной струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения // Вестник АГУ им. Абая. Серия физико-математическая. – № 1(7). – Алматы, 2003. – С. 156-158.

REFERENCES

- 1 Isataev S.I., Tarasov S.B., Toleuov G. Jeksperimental'noe issledovanie trehmernyh turbulentnyh struj, rasprostranjajushhhsja iz sopol s prjamougol'nym vyhodnym secheniem. Vestnik KazGU. Serija fizicheskaja. №2. Almaty, 1995. S. 71–74 (in Russ.).
- 2 Isataev S.I., Toleuov G., Isataev M.S. Jeksperimental'noe issledovanie turbulentnoj svobodnoj strui, istekajushhej iz soplja s prjamougol'nym vyhodnym secheniem. Vestnik KazNU. Serija fizicheskaja. №1(32). Almaty, 2010. S. 15–22 (in Russ.).
- 3 Isataev M.S. Vlijanie krupnomasshtabnyh vihrej na profili skorosti i temperatury svobodnoj strui, istekajushhej iz soplja prjamougol'nogo sechenija. Vestnik AGU im. Abaja. Serija fiziko-matematicheskaja. № 1(7). Almaty, 2003. S. 156-158 (in Russ.).