

УДК 536.46:532.517.4

С.И. Исатаев, Г. Толеуов, М.С. Исатаев\*, К.А. Есеналина

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

\*E-mail: Muhtar.Isataev@kaznu.kz

### Экспериментальное исследование дальнобойности крупномасштабных вихрей в турбулентной свободной струе

**Аннотация.** Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании когерентной структуры турбулентности в трехмерной струе, их дальнобойности. 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:** турбулентность, крупномасштабные вихри, экспериментальное исследование.

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 1. 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, оборудованного 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 дина-

мик 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 линейризованным выходным сигналом скорости. Термоанометр 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.

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  $\approx 10$  ( $c = F_1/F_2$ , где  $F_1$  – площадь



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

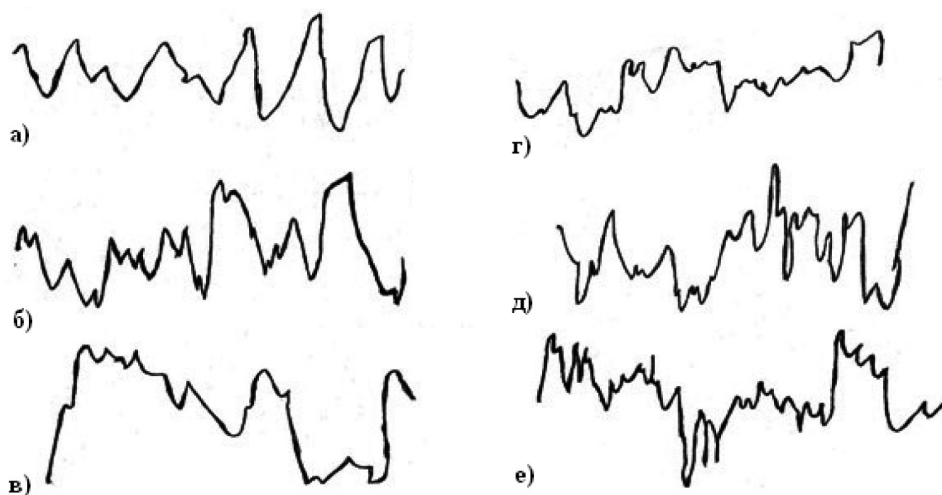
Анализ данных показывает, что с ростом  $\lambda$  происходит постепенное изменение длины начального и переходного участков. С увеличением  $\lambda$  более четко выделяется участок течения, в которой темп убывания скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Она располагается между участком, где 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 дальнобойностью.

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 смещения 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 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.

Как пример, можно показать осциллограммы развертки сигнала мгновенных пульсаций скорости свободной струи (рис.2.), параметр удлинения которого равняется единице ( $\lambda=1$ ).



$\lambda = 1$ ,  $U_0 = 20,7$  м/с;  $f = 0$ ;  $y = 0$ ;  $z = 0$ ;

а)  $x/b=2$ ; б)  $x/b=6$ ; в)  $x/b=10$ ; г)  $x/b=18$ ; д)  $x/b=26$ ; е)  $x/b=30$ .

Масштабы по ординате и абсциссе: а) 10 мV/дел и 1 мс/дел; б) 50 мV/дел и 1 мс/дел;

в) 50 мV/дел и 1 мс/дел; г) 50 мV/дел и 1 мс/дел; д) 50 мV/дел и 5 мс/дел; е) 50 мV/дел и 10 мс/дел.

**Рисунок 2** – Осциллограммы мгновенной пульсации скорости по оси в свободной струе

Анализ показывает наличие вполне определенных частот колебания скорости. Эти колебания скорости на начальном участке совпадают с частотой образования крупномасштабных дискретных вихрей в свободном пограничном слое. С удалением вниз по течению в результате взаимодействия и объединения первоначальных вихрей в более крупные образуются низкочастотные с большей амплитудой колебания скорости. В то же время сохраняются на их фоне высокочастотные колебания скорости, обусловленные первоначальными вихрями.

### 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. – 1995. – №2. – 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. – 2010. – №1(32). – 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. – 2003. – № 1(7). – С. 156-158.

С.И. Исатаев, Ф. Төлеуов, М.С. Исатаев, Қ.А. Есеналина

#### Турбуленттік еркін ағыншалардағы ірімасштабты құйындардың алысқа таралуын эксперименттік зерттеу

Жұмыстың мақсаты үшөлшемді ағыншадағы турбуленттіліктің когеренттік құрылымдарын, олардың алысқа таралуын эксперименттік зерттеу. Ағыншалық ағындарда бастапқы туындаған құйындардың ұсақталып ыдырап кетпейтіндігі, ал қосақталып бір-бірімен әсерлесе отырып және қосылып, ағыс бағытында ағынша шамамен өшкенге шейін өзінің индивидуалдылығын сақтайтын, құйындардың үлкен конгломератын құрайтыны орнатылды. Турбуленттік пульсациялардың максималды жиілігі, ағыншаның бастапқы бөлімшесінде туындайтын бірінші реттік ірімасштабты құйындардың жиілігінен артпайтындығы эксперимент жүзінде дәлелденді.

**Түйін сөздер:** турбуленттік, үлкен масштабты құйындар, эксперименттік зерттеу.

S. Isatayev, G. Toleuov, M. Isatayev, K. Esenalina

#### Experimental study of large-scale vortices range in turbulent free jet

The aim of this work is the experimental investigation of the coherent structure of turbulence in a three-dimensional jet, their maximum range. It was found that the jet streams originally appeared vortices can decay into smaller and mutually interacting with each other and merge to form a large conglomerate of eddies that retain their individuality until about the decay of the jet in the direction of flow. Experimentally, we have shown that the maximum frequency of turbulent fluctuations do not exceed the frequency of the primary large-scale vortices formed in the initial section of the jet stream.

**Keywords:** turbulence, large-scale vortices, experimental research