

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАЛЬНОБОЙНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ СТРУЕ

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

*НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы*

e-mail: [Muhtar.Isataev@kaznu.kz](mailto:Muhtar.Isataev@kaznu.kz)

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.

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 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 микроманометр (12) марки ММН-240.

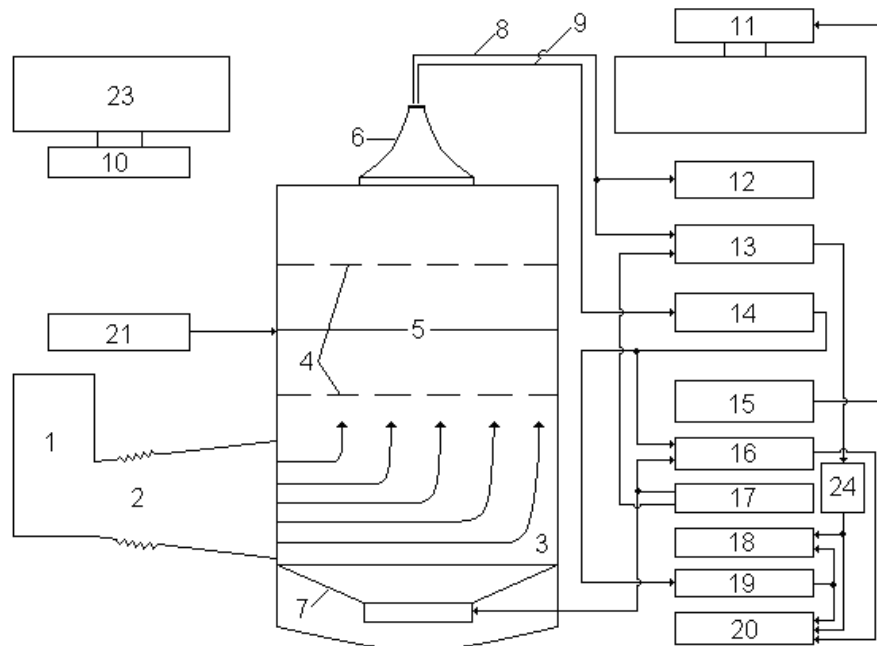
Пульсации скорости измерялись двухканальной термоанемометрической системой (14) с линеаризованным выходным сигналом скорости. Термоанемометр был соединен с осциллографом. Осциллограмма пульсаций скорости записывались на экране запоминающего осциллографа СВ-13 (18) при заданной скорости развертки сигнала.

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

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  $d_e$  был приблизительно таким же, как диаметр круглого сопла. Здесь  $d_e = 2\sqrt{ab/\pi}$



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-микроманометр 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-теневого прибор Теплера ИАБ-451; 24-дифференциальный усилитель.

Рис.1. Схема экспериментальной установки

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  $\lambda$  в поперечных профилях скорости по этой же оси число максимумов также увеличивается (например, для  $\lambda=16$  число максимумов равны 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  $\lambda$ .

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.

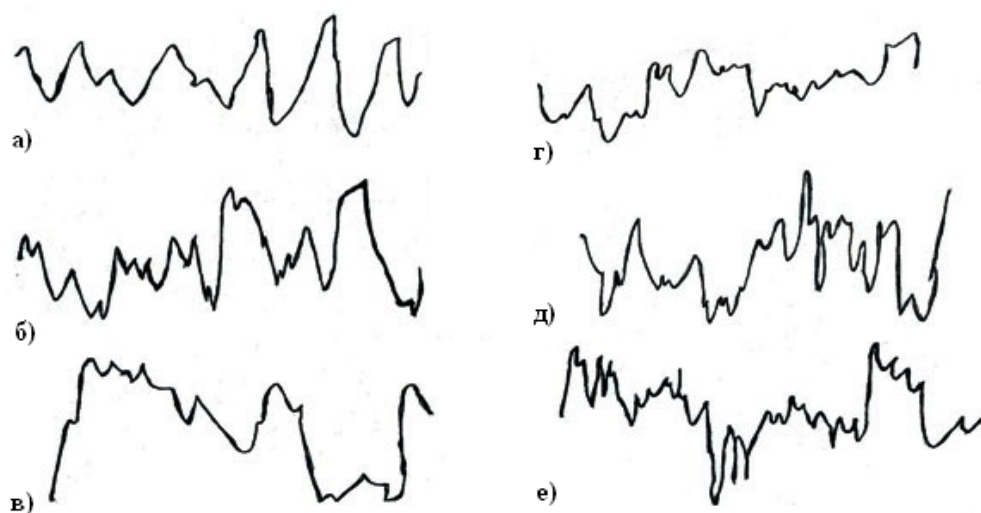
В работе [1] представлены результаты измерений осевой скорости  $U_m$  в струях, истекающих из сопел с различной величиной  $\lambda$ , при скорости истечения  $U_0=20$  м/с.

Анализ данных показывает, что с ростом  $\lambda$  происходит постепенное изменение длины начального и переходного участков. С увеличением  $\lambda$  более четко выделяется участок течения, в котором 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 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 ( $\lambda=1$ ).



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

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.

Рис.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., Төлеуов 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., Төлеуов 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.

### ТУРБУЛЕНТТІК ЕРКІН АҒЫНШАЛАРДАҒЫ ІРІМАСШТАБТЫ ҚҰЙЫНДАРДЫҢ АЛЫСҚА ТАРАЛУЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

**Исатаев С.И., Төлеуов Г., Исатаев М.С., Есеналина Қ.А.**  
*ЭжТФҒЗИ, аль-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы*

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 индивидуалділігін сақтайтын, құйындардың үлкен конгломератын құрайтыны орнатылды. Турбуленттік пульсациялардың максималді жиілігі, ағыншаның бастапқы бөлімшесінде туындайтын бірінші реттік ірімасштабты құйындардың жиілігінен артпайтындығы эксперимент жүзінде дәлелденді.

### EXPERIMENTAL STUDY OF LARGE-SCALE VORTICES RANGE IN TURBULENT FREE JET

**Isatayev S., Toleuov G., Isatayev M., Esenalina K.**  
*Al-Farabi KazNU, Almaty*

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.