

## ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ ТРЕХМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

С.И. Исатаев, С.Б. Тарасов, Г. Толеуов, М.С. Исатаев, М.К. Асембаева

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

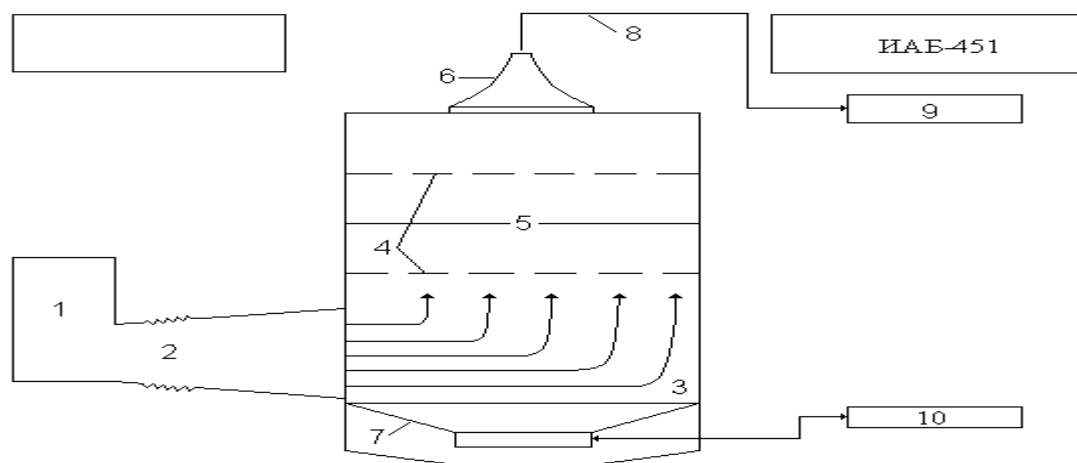
Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании средних характеристик течения в трехмерной струе в широких пределах изменения соотношения сторон сопла и начальной скорости при наличии акустического воздействия и исследование когерентной структуры турбулентности в трехмерной струе и выяснение роли влияния таких структур на аэродинамику струи.

Очень важным свойством, присущим свободным турбулентным струям, является чувствительность ее к внешним воздействиям. Для плоских и круглых струй, где наличие когерентных структур на начальном и переходном участках делает их чувствительными к воздействию различного рода периодических и, в частности, акустических возмущений, проблемы, касающиеся внешних воздействий, довольно подробно исследованы. Что касается трехмерных струй, обладающих повышенной чувствительностью к низкочастотным воздействиям [1, 2], подобные экспериментальные исследования почти не производились.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании средних характеристик течения в трехмерной струе в широких пределах изменения соотношения сторон и начальной скорости при наличии акустического воздействия и исследование когерентной структуры турбулентности в трехмерной струе и выяснение роли влияния таких структур на динамику струи.

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.



- 1-вентилятор; 2-виброгасящий переход; 3-успокоительная камера;  
4-выравнивающие сетки; 5-нагреваемая сетка; 6-сопло; 7-динамик; 8-трубка Пито;  
9- микроманометр; 10-звуковой генератор

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

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 (10) в выходном сечении струи создаются синусоидальные колебания скорости выбранной частоты.

Для измерения средней скорости и динамического давления применялись трубка Пито (8) и микроманометр (9) марки ММН-240.

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 (в дальнейшем оно будет называться параметром соотношения сторон сопла) называют отношение длинной стороны  $a$ , к короткой стороне  $b$  на срезе 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  $d_3$  был приблизительно таким же, как диаметр круглого сопла. Здесь  $d_3 = 2\sqrt{ab/\pi}$ .

Основные измерения проведены для  $\lambda = 2,66$ .

Скорость потока в процессе опыта изменялась от 2,78 до 6 м/с. Основные измерения проведены при скорости истечения на выходе из сопла  $U_0 = 6$  м/с, что соответствовало числу Рейнольдса  $Re \sim 0,97 \cdot 10^4$ , рассчитанного по эффективному диаметру.

Воздействия на струю осуществлялись излучателем звука, размещенным в успокоительной камере фронтально к выходному сечению сопла. Опыты в основном проводились как при отсутствии внешнего воздействия, так и при наличии воздействия, соответствующего числу Струхала:

$$Sh = \frac{f_b \cdot b}{U_0} = \frac{f_a \cdot a}{U_0} = \frac{f_{d_3} \cdot d_3}{U_0} = 0,48,$$

где  $f_b, f_a$  и  $f_{d_3}$  - есть частоты, рассчитанные по короткой и длинной сторонам сопла и по эффективному диаметру этих сопел.

Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в трехмерных струях проводилось на той же экспериментальной установке, схема которой была показана на рисунке 1. Воздух, поступающий в успокоительную камеру через выравнивающие сетки, истекал из прямоугольного сопла. Струя при этом нагревалась с помощью нагревателя, смонтированного во входном сечении сопла.

Для измерения распределения температуры струи использовалась медьконстантановая термопара, «горячий» спай которой размещался в потоке, а другой, так называемый «холодный» спай, находился при комнатной температуре. ЭДС термопары измерялась цифровым вольтметром. Сигнал от термопары подавался также на двухкоординатный самописец, где производились непрерывные записи изменения температуры вдоль оси струи и в поперечных сечениях.

На основе полученных результатов измерения пространственных профилей полного давления, на основе наблюдения и фотографирования теневой картины течения и из сравнения безразмерных профилей скорости и избыточной температуры трехмерной струи, можно представить упрощенную схему эволюции формы и размера вихревых структур на различных расстояниях от среза сопла. Далее, как это показано на рисунке 2, на основе этой же схемы нам удалось объяснить природу возникновения немонотонности в профилях скорости и избыточной температуры струи.  $\Delta T_0$  - разность между температурой в начальном сечении струи и в окружающем пространстве ( $\Delta T_0 = T_0 - T_\infty$ ).

На рисунке 2 показаны примеры распределения скорости и температуры в трехмерной струе при  $\lambda = 2,66$  на участке бифуркации вихревых возмущений, генерированных управляющим воздействием. Частота воздействующего сигнала соответствовали числу Струхала:

$$Sh = \frac{f_a \cdot a}{U_0} = 0,48.$$

На этих же рисунках приведены контуры периферийной части ядра вихревого возмущения с видом в направлении вдоль струи к выходному сечению сопла т.е. в плоскости  $yz$ . Приблизительная форма их получена на основе сравнения двух взаимноперпендикулярных проекций мгновенной теневой картины течения со стороны длинной и короткой кромок сопла и визуального наблюдения поведения пространственных профилей полного давления. По расположению этих профилей строились также размеры вихрей по оси, параллельной длинной стороне сопла ( $z$ ). По характерным особенностям (на рисунке 2 они выделены жирными точками), наблюдаемым в профилях температуры и скорости, подбирались размеры вихрей по оси, параллельной короткой стороне сопла ( $y$ ). Например, две крайние жирные точки на оси абсциссы, соответствующие внешней границе крупных вихрей, показывают, что эта граница по своему направлению вращения имеет максимальную отрицательную скорость (пробуксовка вихря) и при этом соприкасается с окружающим холодным слоем воздуха.

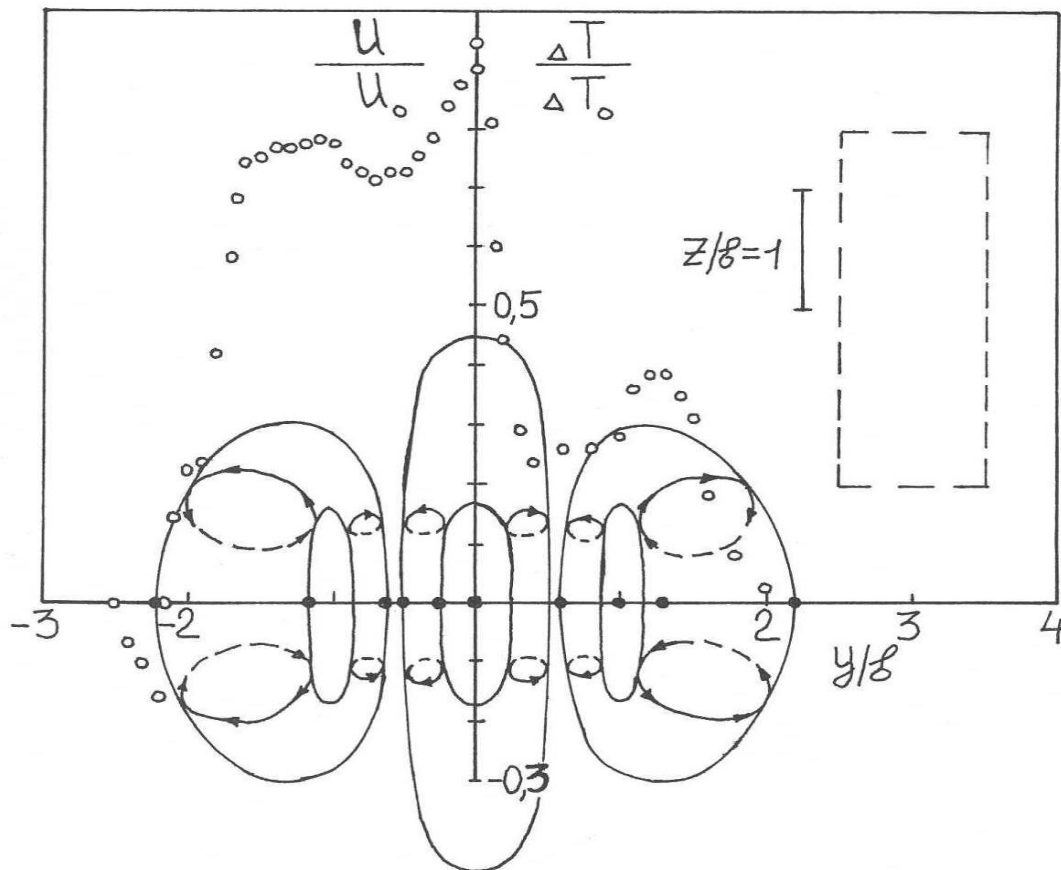
Из анализа результатов наблюдения и фотографирования теневой картинке течения следует, что происходит непрерывная деформация вихревого возмущения, сопровождающейся сложной траекторией сближения и перемены его частей, развивающихся со стороны коротких и длинных кромок сопла. Наличие минимума  $U/U_0$  на участке  $0,5 < y/b < 1$  при  $x/b = 4$  (рисунок 2) связано с образованием локализованной области, в которой линейная скорость вихря после завершения процесса перемены вихревого шнура вблизи оси струи и окончательного формирования вихревого тора направлена против основного потока (две жирные точки на указанном участке). В конечном счете это и объясняет причину разрыва трехмерной струи на три части [3] при акустическом на нее воздействии. Пунктирной линией на рисунке обозначены контуры выходного сечения сопла для оценки размера и относительного расположения вихревых возмущений.

При поступательно-вращательном переносе инертной массы, как это происходит в крупных вихрях, близлежащие части неподвижной окружающей холодной жидкости циркуляцией переносятся во внутрь нагретой струи, и изменяет распределение температуры в поперечном направлении. При акустическом воздействии, вихри укрупняясь по размеру, еще больше усиливают такой процесс и в результате приводят к возникновению резких немонотонностей в профилях избыточной температуры.

Датчик температуры при перемещении поперек струи регистрирует более высокую температуру в центральной ее части, менее высокую в фокусах крупных вихрей, а между фокусами крайнего тора минимум ее значения (характерная жирная точка соответствующая

$y/b=1$  для  $x/b=4$ , рисунок 2). Минимальная избыточная температура соответствует области струи, образуемой переносом более холодных слоев воздуха.

Следует иметь в виду также, что на рисунке 2 приведены средние характеристики  $U/U_0$  и  $T/T_0$ , однако сравнения проводится с теневой картиной течения, получаемой при импульсном освещении и соответствующей мгновенной форме вихревых возмущений в измеряемом сечении. Поэтому профили средних характеристик необходимо рассматривать как осредненное суммарное поле, создаваемое средним течением и движущимися вихревыми структурами, имеющими в каждом сечении вполне определенную форму с собственными внутренними полями скорости и температуры.



$U/U_0-\lambda=3$ ;  $\Delta T/\Delta T_0-\lambda=2,66$ .  $U_0=6,03$  м/с;  $x/b=4$ ;  $f=89$  Гц;  $T_0=324$  К  
( $\Delta T_0=23,3$ К).

Рисунок 2 – Распределение безразмерной скорости и избыточной температуры в поперечном сечении трехмерной струи. Мгновенная картина бифуркации вихревых возмущений.

Таким образом, генерированные воздействием вихревые структуры в каждом сечении имеют типичную форму, связанную с собственным внутренним полем скорости. Немонотонность в профилях средних характеристик обусловлены сложением среднего течения с осредненным полем, создаваемым движущимися вихревыми структурами.

## Литература

1. Уханова Л. Н., Войтович Л. Н. Некоторые особенности развития когерентных структур течения на начальном участке трехмерных турбулентных струй //Инж. - физ. журнал.– 1984.–Т.47, N 4. –с. 537-543.
2. Ching-Ming Ho, Ephraim Gutmare. Vortex induction and mass Entrainment in a small-aspectretic elliptic jet//J. Fluid Mech.–1987, V. 179.–P.383-405.
3. Исатаев С.И., Тарасов С.Б., Төлеуов Г. Использование теневого метода цветной визуализации при изучении вихревых структур в трехмерных струях //Тезисы докладов 1 Всесоюзного семинара «Оптические методы исследования потоков». Новосибирск, ИТФ СО АН СССР, 1989 г.

### **ҮШӨЛШЕМДІ ТУРБУЛЕНТТІК АҒЫНШАНЫҢ ДИНАМИКАСЫНА АКУСТИКАЛЫҚ ӨРІСТІҢ ӘСЕРІ**

**С.И. Исатаев, С.Б. Тарасов, Г. Төлеуов, М.С. Исатаев, М.К. Әсембаева**

Берілген жұмыстың мақсаты, сопло жақтары қатынастарының өзгеруінің және бастапқы жылдамдықтың кең диапазондарында сыртқы әсер бар кезде үшөлшемді ағыншаның орташа сипаттамаларын эксперименттік зерттеу және ағыншадағы турбуленттіліктің когеренттік құрылымдарын зерттеу мен осындай құрылымдардың ағыншаның аэродинамикасына әсерінің рөлін түсіндіру болып табылады.

### **THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF INITIAL AND TRANSITIONAL PARTS OF THREE-DIMENSIONAL JETS**

**S. Isatayev, S. Tarasov, G. Toleuov, M. Isatayev, M. Asembayeva**

The work represents the results of experimental research of aerodynamics of three-dimensional turbulent jets flowing from nozzles with rectangle outflow face. The results of measurements of middle and pulse flow characteristics of three-dimensional jets are given. The data on axis speed and turbulence intensity are given and an attempt to uncover their interrelation is made. The results of experimental data comparison on axis speed attenuation of three-dimensional jets with data for axis symmetric stream are presented.