

*С. И. ИСАТАЕВ, Г. ТОЛЕУОВ, М. С. ИСАТАЕВ, Н. МАЙМАКОВА, Н. РЫСБАЕВА,  
А. ТУРГАНБАЙ, Д. НУРГАЛИЕВА*

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ СВОБОДНЫХ СТРУЙ ПРИ НАЛИЧИИ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании средних динамических характеристик течения в трехмерной струе при наличии акустического воздействия и влияния турбулентных структур на динамику струи. При измерении скорости потока при наличии акустического воздействия нельзя пользоваться трубкой Пито, т.к. статическое давление отлично от атмосферного. Простым и достаточно надежным способом в таком случае является метод встречных трубок Пито. Для  $\lambda=3$  получены распределения скорости и статического давления вдоль оси параллельной короткой стороне прямоугольного сопла при низкочастотном воздействии –  $Sh_a = 0,48$  ( $f_a = 89$  Гц). Дается для сравнения и поле полного давления. Из анализа результатов видно, что резкие немонотонности обнаруживаемые в распределениях полного давления характерны и для профилей скорости, но с той лишь разницей, что полное давление здесь проявляет себя как сумма скоростного напора и разницей статического и атмосферного давлений.

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

**Тірек сөздер:** жазық еркін ағынша, ірі масштабты құйындар, турбуленттік, жылдамдықтың және температураның таралуы, алысқа ұру.

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

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

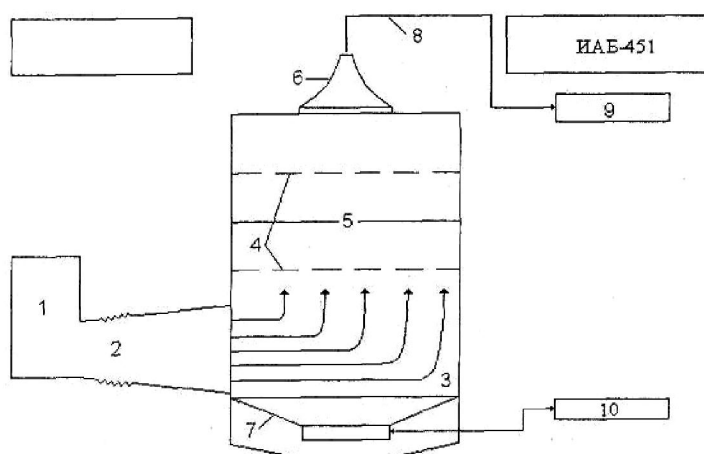


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

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

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

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 и при параметре удлинения  $\lambda = 3$ .

Воздействия на струю осуществлялись излучателем звука, размещенным в успокоительной камере фронтально к выходному сечению сопла. Опыты проводились при наличии воздействия, соответствующего числу Струхалия:

$$Sh = \frac{f_b \cdot b}{U_0} = \frac{f_a \cdot a}{U_0} = \frac{f_{d_э} \cdot d_э}{U_0} = 0,48, \quad (1)$$

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

При измерении скорости потока при наличии акустического воздействия нельзя пользоваться трубкой Пито, так как статическое давление отлично от атмосферного. Простым и достаточно надежным способом измерения скоростей и давлений в таком случае является метод встречных трубок Пито. Подробно этот метод описывается в работе\*. Практически измерительный насадок

\* Исатаев С.И., Айнабекова С.С. Исследование пристенной турбулентной струи, распространяющейся вдоль криволинейной поверхности // Проблемы физики газа, плазмы и жидкости. – Алматы: Ғылым, 1998. Т. 2. – С. 37-49.

состоит из двух трубок Пито, укрепленных на общей установке так, чтобы их носики были направлены навстречу друг другу и слегка разведены. При расчетах используются следующие формулы:

$$\frac{\rho U^2}{2} = \xi(km_1 - km_2) \quad (2)$$

$$U = \sqrt{2\xi(km_1 - km_2) / \rho}, \quad (3)$$

а также

$$P_{cm} = km_1 - \frac{\rho U^2}{2} = km_1 - \xi(km_1 - km_2), \quad (4)$$

где  $km_1$  – показание манометра, если трубка Пито направлена навстречу потоку;  $P_{cm}$  – статическое давление в данной точке потока;  $km_2$  – показание манометра, если бы мы повернули трубку Пито по потоку и установили ее так, чтобы носик ее находился в той же точке, что и первая трубка.

Коэффициент  $\xi$  – определяется при тарировке насадка в аэродинамической трубе. Экспериментально найденное его значение –  $\xi = 0,87$ .

Измерение показали, что искусственные возмущения, частота которых совпадает с характерной частотой или близка к ней ( $Sh_a \approx 0,42$ ), генерируют резкие немонотонности в распределениях полного давления, сохраняющиеся на больших расстояниях вдоль потока. На рисунке 2 приведено несколько распределений, иллюстрирующих указанное явление для  $\lambda = 3$ .

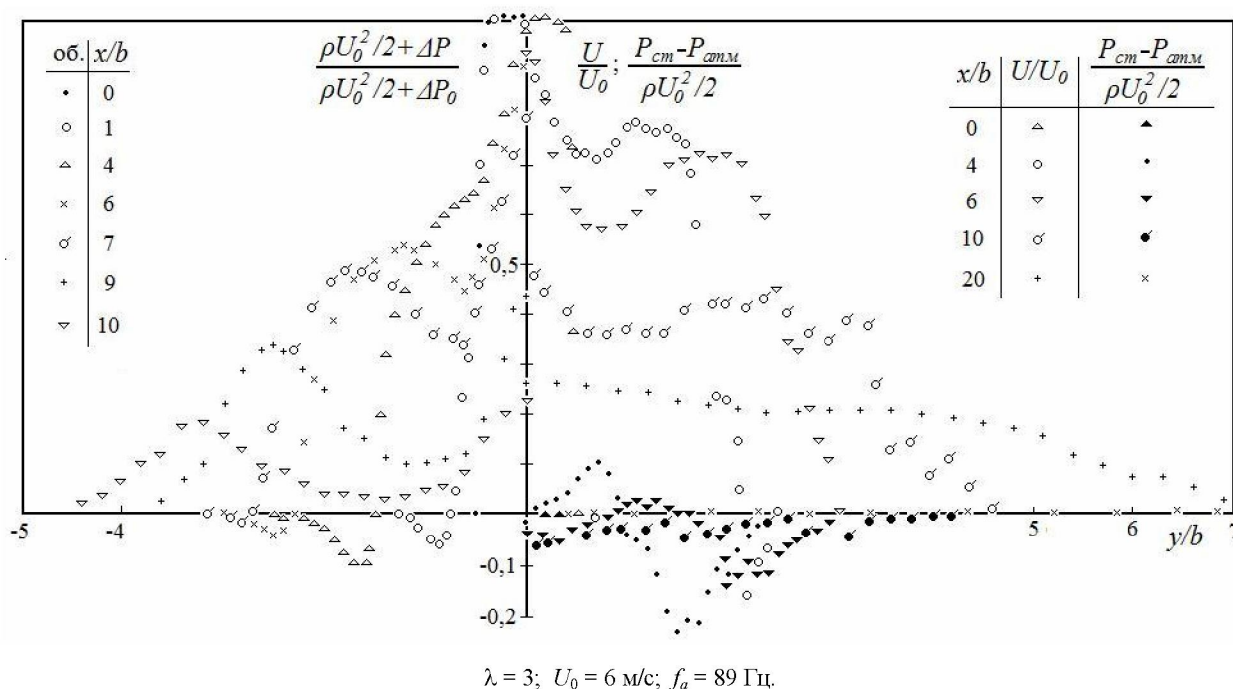


Рисунок 2 – Безразмерные профили скорости, полного и статического давлений в плоскости поперечного сечения трехмерной струи

Полное давление в данном случае измерялось с помощью трубки Пито. Известно, что если находящуюся в воздушном потоке такую трубку соединить с резервуаром манометра, оставив резервуар манометра открытым, то высота столбика жидкости в манометре уравнивает разность полного и атмосферного давлений. С наложением на струю внешнего воздействия в потоке возникает статическое давление, отличное от атмосферного. Тогда с учетом этого, вышеупомянутая разность давлений выражается следующей формулой

$$km = \frac{\rho U^2}{2} + P_{cm} - P_{амм} = \frac{\rho U^2}{2} + \Delta P, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная манометра;  $m$  – высота столбика жидкости в манометре;  $P_{ст}$  – статическое давление;  $\Delta P$  и  $\frac{\rho U^2}{2}$  разность статического и атмосферного давлений и скоростной напор в фиксированной точке потока. На рисунке 2 в ординате указано отношение полного давления в таких точках к полному давлению на срезе сопла.

Дальше, как показано на рисунке 2, по координате  $y$  начиная с калибра  $x/b$ , равном 1 и до калибра  $x/b$ , равном 7, в распределениях полного давления наблюдается отрицательное ее значение. Это, по-видимому, связано с тем, что возникаемое в потоке некоторое разрежение приводит к тому, что, в конечном счете, полное давление становится меньше атмосферного. Такое явление наблюдается на очень близком расстоянии от среза сопла и по координате  $z$ .

Поле скорости и давлений потока измерялись по методу встречных трубок Пито. На рисунке 2 в качестве примера ( $\lambda=3$ ) показано распределение скорости и статического давления вдоль оси параллельной короткой ( $y$ ) стороне прямоугольного сопла при низкочастотном воздействии –  $Sh_a = 0,48$  ( $f_a = 89$  Гц). Там же дается для сравнения и поле полного давления.

Как видно из рисунка, резкие немонотонности обнаруживаемые в распределениях полного давления характерны и для профилей скорости, но с той лишь разницей, что полное давление здесь проявляет себя как сумма скоростного напора и разницей статического и атмосферного давлений ( $\Delta P$ ). В распределении скорости, для калибра  $x/b$ , равном 4, наблюдается отрицательное ее значение. Это, видимо, связано с тем, что существующий в слое смешения крупномасштабный вихрь пробуксовывая в пространстве буквально «заставляет» течь поток в обратном направлении. Появление немонотонностей в распределениях полного давления и скорости, а также изменение статического давления, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения от атмосферного также связаны существованием крупномасштабных вихрей и дальнейшей их динамикой.

#### REFERENCES

Isatayev S. I. Aynabekova S. S. Research of the wall turbulent stream extending along a curvilinear surface. The Problem of physics of gas, plasma and liquid. – Alma-Ata: Gylym. – 1998, T. 2. – P. 37-49 (in Russ.).

#### Резюме

*С. И. Исатаев, Ф. Төлеуов, М. С. Исатаев, Н. Маймақова,  
Н. Рысбаева, А. Тұрғанбай, Д. Нұрғалиева*

(ЭЖТФҒЗИ, эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан)

#### АКУСТИКАЛЫҚ ӘСЕР БАР КЕЗДЕГІ ТУРБУЛЕНТТІК ЕРКІН АҒЫНШАНЫ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Берілген жұмыстың мақсаты сыртқы әсер бар кездегі үшөлшемді ағыншаның орташа динамикалық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу және турбуленттік құрылымдардың ағыншаның динамикасына әсерінің рөлін түсіндіру болып табылады. Акустикалық әсер бар кездегі ағынның жылдамдығын өлшеуді Пито түтікшесімен жүргізуге болмайды, өйткені статикалық қысым атмосфералықтан өзгеше. Бұл жағдайда қарапайым және жеткілікті тәсіл – Питоның қарама-қарсы түтікшелер тәсілі.  $\lambda=3$  соплосы үшін  $Sh_a = 0,48$  ( $f_a = 89$  Гц) төменгі жиілікті әсер ету кезінде тікбұрышты соплонның қысқа жағына параллель өс бойындағы жылдамдықтың және статикалық қысымның таралулары алынды. Толық қысымның өрісі де салыстыру үшін берілген. Талдаудан жылдамдықтың профилінде және толық қысымның профилінде кілт монотонды емес екенін көруге болады. Толық қысым бұл жерде жылдамдықтың қарқыны мен статикалық және атмосфералық қысымдардың айырымының қосындысы ретінде алынған.

**Тірек сөздер:** жазық еркін ағынша, ірі масштабты құйындар, турбуленттік, жылдамдықтың және температураның таралуы, алысқа ұру.

## Summary

*S. Isatayev, G. Toleuov, M. Isatayev, N. Maymakova,  
N. Rysbaeva, A. Turganbay, D. Nurgalieva*

(Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

### EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT JETS IN THE PRESENCE OF FREE SOUND EFFECTS

The aim of this work is the experimental investigation of dynamic characteristics of the secondary flow in a three-dimensional jet in the presence of acoustic impact and influence of the turbulent structures on the dynamics of the jet. When measuring the flow rate in the presence of acoustic impact is impossible to use a Pitot tube, as static pressure different from atmospheric. Simple and fairly reliable method in this case is the method of colliding Pitot tubes.  $\lambda = 3$  for the distributions of speed and static pressure along the axis parallel to the short side of the rectangular nozzle at low frequency impact –  $Sh_a = 0,48$  ( $f_a = 89$  Hz). Given for comparison and the total pressure field. From the analysis results show that the sharp nonmonotonocities found in the distributions of the total pressure characteristic for the velocity profiles, but with the difference that here the total pressure manifests itself as the sum of the dynamic pressure and the difference of static and atmospheric pressure.

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