

## ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

**С.И. Исатаев, Г. Толеуов, М.С. Исатаев**

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

Приводятся результаты экспериментального исследования средних динамических характеристик трехмерных турбулентных струй, распространяющихся из сопел с прямоугольным выходным сечением.

В работах [1-5,9,10] посвященных экспериментальному исследованию трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопел с прямоугольным выходным сечением был обнаружен ряд интересных особенностей: деформация поперечного сечения струй, анизотропия течения, наличие в таких струях трех областей затухания осевой скорости (начального участка, где  $U_m = const$ , переходного участка, где  $U_m \sim x^{-1/2}$  и основного участка, где  $U_m \sim x^{-1}$ ).

Эти особенности развития трехмерных струй по-разному проявляют себя с изменением удлинения сопла  $\lambda$  ( $\lambda = a/b$ , где  $a$  – размер длинной стороны сопла,  $b$  – размер короткой стороны сопла).

В задачу настоящей работы входил анализ полученных подробных экспериментальных данных об изменении средних характеристик течения в зависимости от числа Рейнольдса и  $\lambda$  при сохранении неизменными остальных параметров течения с целью обобщения результатов.

Экспериментальные исследования проводились на установке, состоящей из вентилятора, виброгасящего перехода, успокоительной камеры и сопла с прямоугольной формой выходного сечения. Для формирования трехмерных струй применены сменные сопла. В опытах использовались сопла, удлинения которых составляли  $\lambda = 1; 2,66; 5,07; 7,61; 11; 16; 25,25$  и круглое сопло. Спрофилированные по формуле Витошинского сопла имели одинаковую длину 90 мм, поджатие близкое к 10, причем значение 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. Распределения давления и скорости на срезе сопла во всех случаях были равномерными.

Основные измерения проведены при скоростях истечения на выходе из сопла  $U_0$  равными 20 м/с и 40 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса  $3,2 \times 10^4$  и  $6,5 \times 10^4$  рассчитанных по эффективному диаметру ( $Re = U_0 \times d_{э\phi} / \nu$ ).

Интенсивность турбулентности, оцениваемая по величине продольной пульсации скорости, на выходном сечении сопла составляла 0,025 – 0,27 %.

На рисунке 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 (из сравнения площадей среза выхода круглого и квадратного сопел, для осесимметричной струи осевая координата взята в виде  $\frac{x}{b} = 1,33 \times \frac{x}{d_{кр}}$ , где  $\frac{x}{b}$  и  $\frac{x}{d_{кр}}$  - относительные координаты (калибр)).

Анализ данных показывает, что с ростом  $\lambda$  происходит постепенное изменение длины начального и переходного участков. С увеличением  $\lambda$  более четко выделяется область 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 ( $U_m/U_0 \sim x^{-1}$ ).

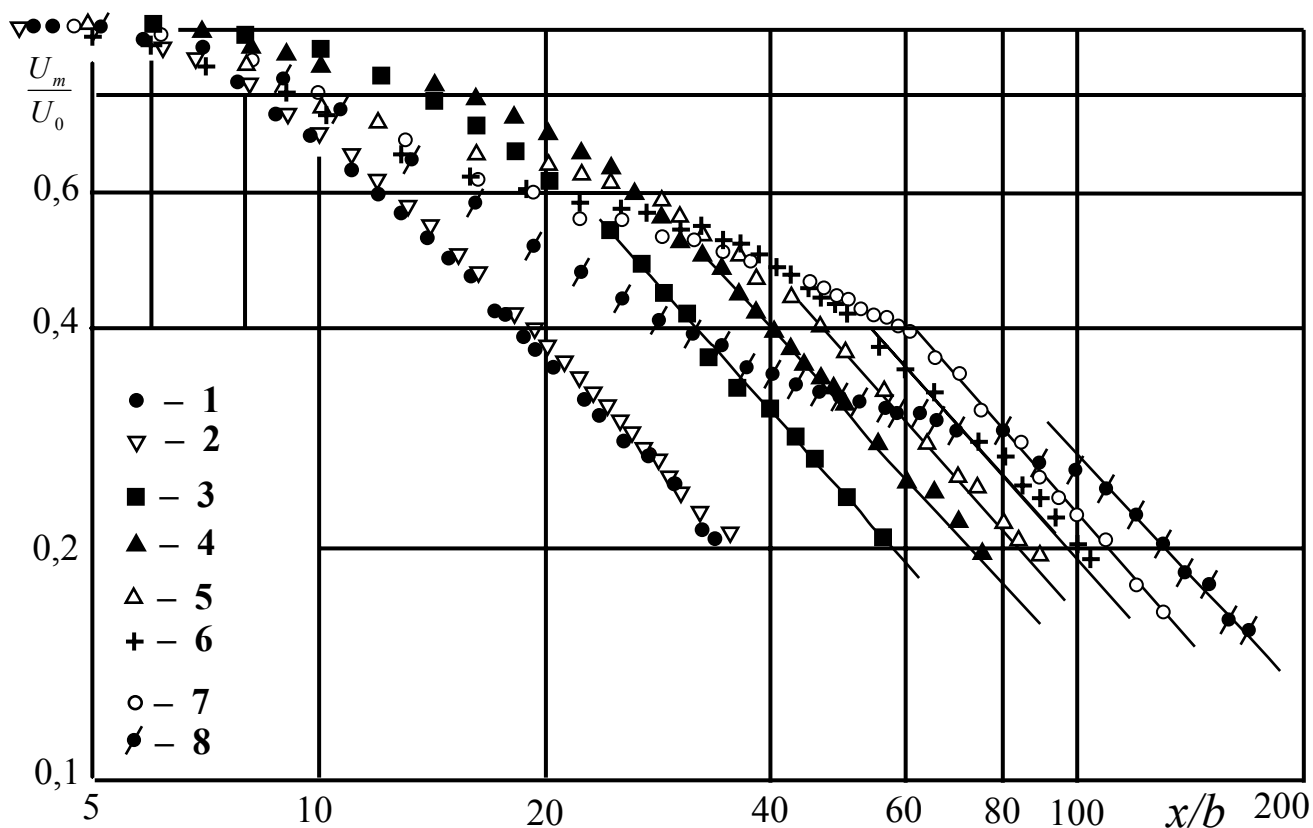


Рисунок 1. Закономерности изменения осевой скорости трехмерных струй, истекающих из прямоугольных сопел различного удлинения и осесимметричной струи: 1 – круглое сопло; 2 –  $\lambda=1$ ; 3 – 2,66; 4 – 5,07; 5 – 7,61; 6 – 11; 7 – 16; 8 – 25,25.  $x$  – координатная ось вдоль распространения течения.

Выведено эмпирическое соотношение для расчета осевой скорости на основном участке трехмерных струй в интервале  $2 \leq \lambda \leq 25$ :

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{8,07 \times \lambda^{1/3}}{\frac{x}{b} - 2,85 \times \sqrt{\lambda - 1}} \quad (1)$$

На рисунке 1 эти результаты представлены в виде сплошных линий.

Если результаты измерений, приведенные на рисунке 1, представить в виде зависимости  $x/b = f(\lambda)$  при  $U_m/U_0 = 0,99$ , как это показано на рисунке 2, то можно увидеть, что протяженность участка с выбранным уровнем скорости  $U_m$  имеет максимальное значение при определенном значении  $\lambda$ . Установлено, что длина начального участка  $x_H/b$  струи увеличивается с 4,2 до 7 в интервале  $1 \leq \lambda \leq 3$  и при  $\lambda > 3$  снова уменьшается до первоначального значения  $x_H/b \approx 4,2$  при  $\lambda = 10$  и при  $\lambda > 10$  остается неизменной. Следует отметить, что если отнести длину начального участка к эффективному диаметру круга с площадью, равной площади выходного сечения прямоугольного сопла, то это значение сохраняет постоянную величину  $x_H/d_3 \approx 4$  до значений параметра  $\lambda = 3$ .

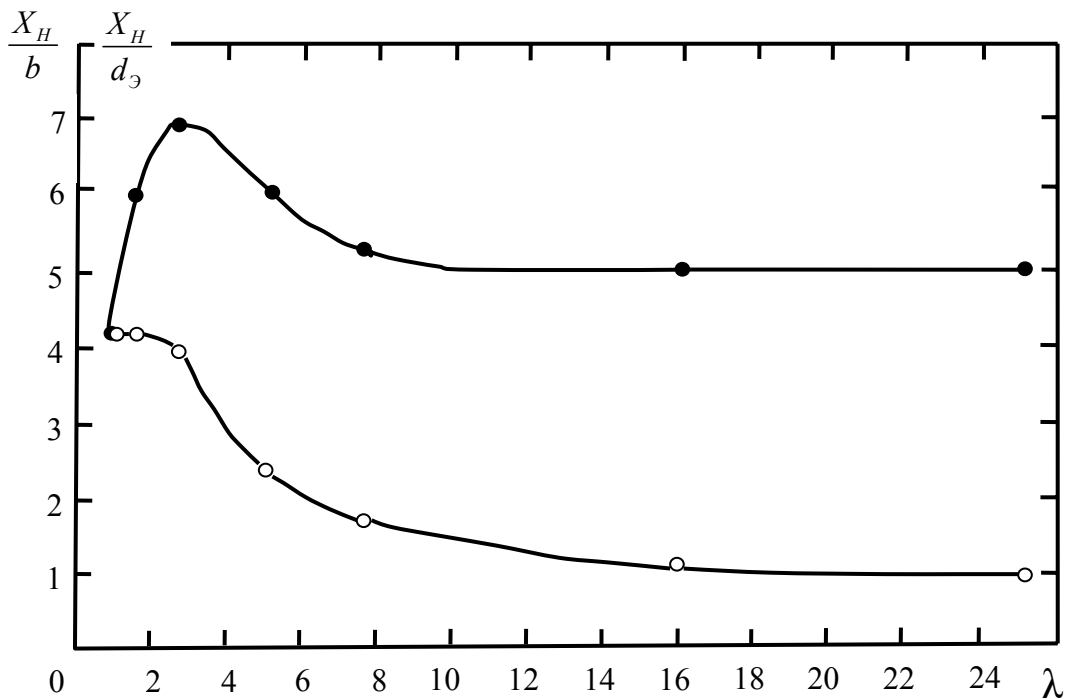


Рисунок 2. Зависимость длины начального участка струи от удлинения сопла:  
 ● –  $x_H/b$ ; ○ –  $x_H/d_3$ .  $U_0 = 20$  м/с.

На рисунке 3 приведены результаты сравнения опытных данных по затуханию осевой скорости трехмерных струй с данными для осесимметричной струи в виде зависимости безразмерной скорости на оси струи от отношения текущего расстояния от среза сопла к эффективному диаметру  $d_3$ . Видно, что на всем протяжении распределение осевой скорости в пределе  $1 \leq \lambda \leq 3$  близко к распределению в осесимметричной струе.

С переходом к  $\lambda=5$  наблюдается сокращение длины начального участка (это хорошо иллюстрируется на рисунке 2 по отношению  $x_H/d_3$ ) и увеличение темпа убывания скорости в переходной области, но при всем этом закономерность падения осевой скорости на основном участке такая же, как и в предыдущем случае.

В диапазоне  $\lambda=7 \div 25$  происходит резкое сокращение длины начальных участков, а на переходном участке наблюдается различный характер распределения осевой скорости, но начиная с определенного расстояния от среза сопла в зависимости от  $\lambda$  все они стягиваются к одной закономерности. На рисунке 3 можно заметить также, что с ростом параметра  $\lambda$  смещается вниз по потоку начало области, в которой темп убывания скорости пропорционален величине  $x^{-1}$ . В этой области струя распространяется как осесимметричная, но в струях, начиная с  $\lambda=7$ , при тех же значениях  $x/d_3$  скорость ниже, чем в осесимметричной.

Дальнейшее исследование показало, что увеличение скорости потока до 40 м/с (рис.4) приводит к выпрямлению (сглаживанию) формы кривой ( $U_0=20$  м/с), которая соответствует к области течения, где темп убывания скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Здесь можно с уверенностью сказать, что в струе происходит четкая перестройка законов затухания осевой скорости от закономерности  $U_m/U_0 \sim x^{-0,5}$ , характерной для плоской струи, к закономерности  $U_m/U_0 \sim x^{-1}$ , характерной для осесимметричной струи. Это подтверждает данные как экспериментальных, так и теоретических исследований многих авторов.

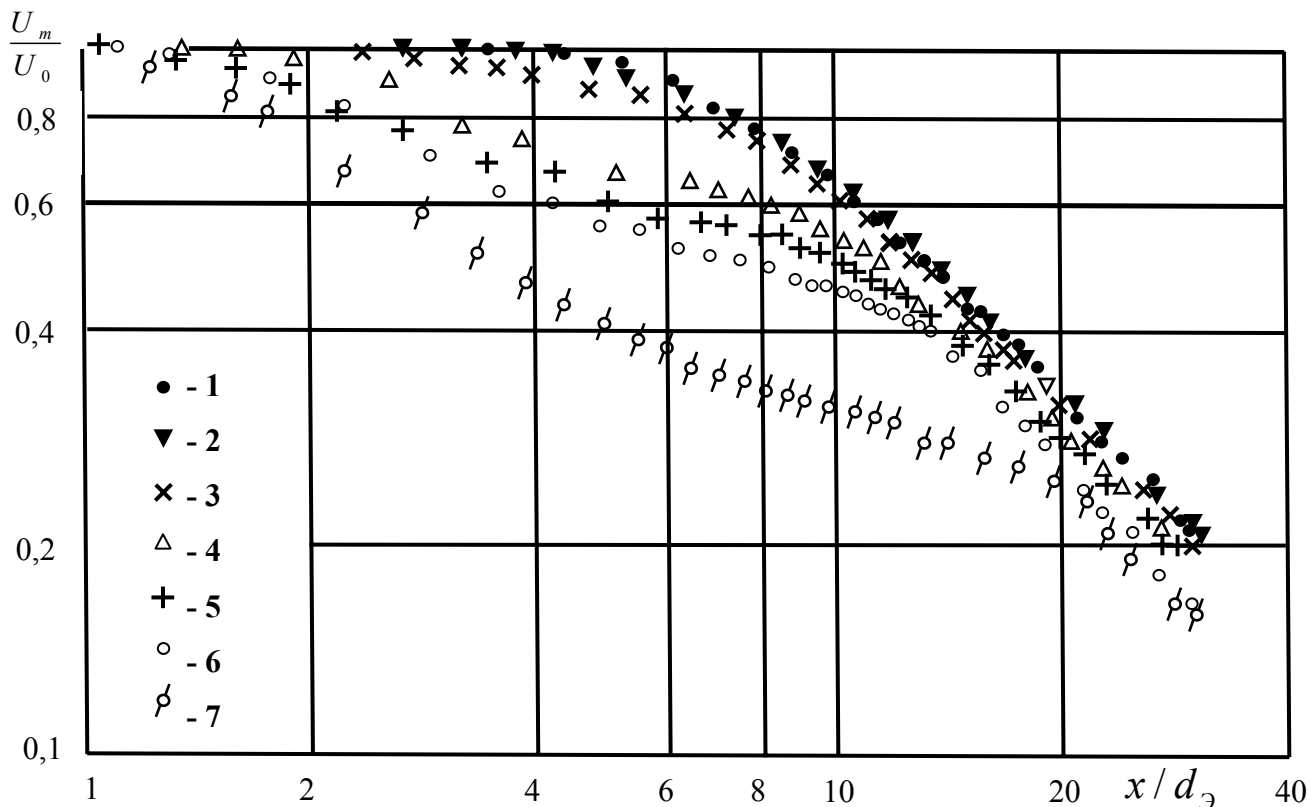


Рисунок 3. Сравнение опытных данных по изменению осевой скорости вдоль оси трехмерной и осесимметричной струй: 1 – круглое сопло; 2 –  $\lambda=2,66$ ; 3 – 5,07; 4 – 7,61; 5 – 11; 6 – 16; 7 – 25,25.  $U_0 = 20$  м/с.

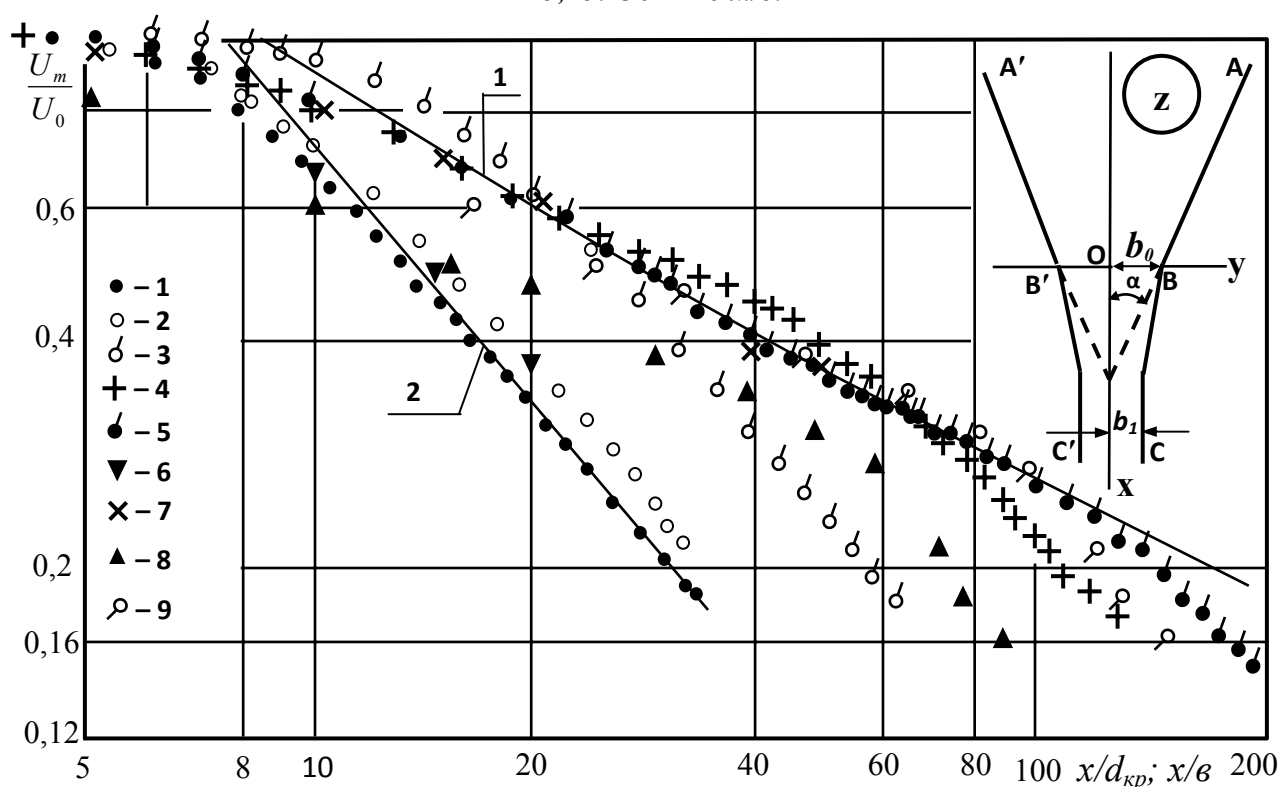


Рисунок 4. Закономерности изменения осевой скорости трехмерной струи при  $U_0=40$  м/с: 1 – круглое сопло; 2 –  $\lambda=1$ ; 3 – 2,66; 4 – 11; 5 – 25,25; 6 – 1 [6]; 7 – 10 [6]; 8 – 12,4 (щелевая диафрагма: [4]); 9 – 12,4 (с применением формулы (5)). Линия 1 – по формуле (2); линия 2 – по формуле (3).

На рисунке 4 показано сопоставление экспериментальных данных других авторов и теоретических кривых для осевой скорости плоской и осесимметричной струй [3], полученных по формулам:

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{2,56}{\sqrt{x/b-2}} \quad (.2)$$

и

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{5,78}{x/d-2} \quad (.3)$$

с нашими экспериментальными данными. Данные 6,7 взяты из работы [6], 8 – для щелевой диафрагмы из работы [4]. В формулах (2) и (3) считалось, что полюс основного участка лежит внутри сопла на расстоянии

$$\frac{ax_0}{b_0} = \frac{a(x-S)}{b_0} = 0,41$$

для плоской струи и

$$\frac{ax_0}{r_0} = \frac{a(x-S)}{r_0} = 0,29$$

для осесимметричной, где  $x$  – расстояние от полюса струи;  $S$  – расстояние от среза сопла;  $x_0$  – расстояние от полюса до среза сопла;  $b_0$  и  $r_0$  – полуширина и радиус среза сопла соответственно;  $a$  – эмпирическая константа, характеризующая структуру струи:  $a=0,11$  – плоская струя;  $a=0,083$  – осесимметричная струя. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие опытных и теоретических значений осевой скорости для данных полюсных расстояний для случая, когда струя распространяется из профилированных сопел.

Как мы упоминали ранее и как показывают результаты на рисунке 4, наши экспериментальные данные и данные других авторов в переходном участке подчиняется закономерности  $U_m/U_0 \sim x^{-0,5}$ , характерной для плоской струи (формула (2)). По-видимому, именно этим обусловлено отсутствие в других работах ([4] и [5]) упоминания о наличии участка с замедленным темпом падения скорости (при скоростях –  $U_0 \leq 20$  м/с), так как они проводили опыты при скоростях потока от 40 до 100 м/с.

Как видно из рисунка 4 экспериментальные данные (обозначения 8), полученные в работе [4] существенно отличаются от наших результатов и из работы [6] при примерно одинаковых значениях параметра  $\lambda$ .

По-видимому, это объясняется тем, что авторы работы [4] продольное расстояние от щели относят к ширине выходной щели, вырезанной в плоской пластине.

При истечении из щели плоской пластины струя в начальном участке сужается и реальная ширина струи будет меньше. Степень сжатия струи, истекающей из щели в плоской пластине, можно оценить по работе [7]. В [7] приведена задача Митчеля [8] об истечении струи идеальной жидкости из сосуда, ограниченного двумя бесконечными симметричными стенками. Выбор оси  $ox$  и  $oy$  в плоскости  $z$  указано на рисунке 4. Через  $\alpha$  обозначен угол, под которым наклонены стенки сосуда к отрицательной оси  $ox$ , а через  $2b_0$  и  $2b_1$  ширина отверстия  $BB'$  сосуда и ширина струи на бесконечности. В работе используя метод Жуковского-Митчеля (метод конформных отображений) дается для сжатия струи значение

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \sin \theta \operatorname{ctg} \frac{\pi \theta}{2\alpha} d\theta}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол вектора скорости с осью  $ox$ .

Формула сильно упрощается в частном случае, когда  $\alpha = \pi/2$ . В этом случае стенки служат продолжением друг друга (щелевая диафрагма для нашего случая) и формула для сжатия струи выглядит следующим образом

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{\pi}{2 + \pi} \approx 0,61. \quad (5)$$

Экспериментальные данные работы [4] с использованием значения начальной ширины струи с учетом коэффициента сужения  $b_1 = 0,61 \times b_0$  приведены на рисунок 4 (обозначения 9), которые удовлетворительно согласуются с нашими результатами.

Если приведенные выше результаты ( $U_0 = 40$  м/с) сравнить с данными для осесимметричной струи в виде зависимости  $U_m/U_0$  от  $x/d_3$ , то, как видно из рисунок 5, различие в уровнях скорости при постоянстве  $x/d_3$  для области, где струя распространяется как осесимметричная, будут уменьшенными относительно случая, когда скорость потока составляла  $U_0 = 20$  м/с. По-видимому, это объясняется уменьшением толщины пристенных пограничных слоев при увеличении  $Re$  и соответствующим уменьшением масштаба возникающих вихрей, способствующих увеличению дальности струи.

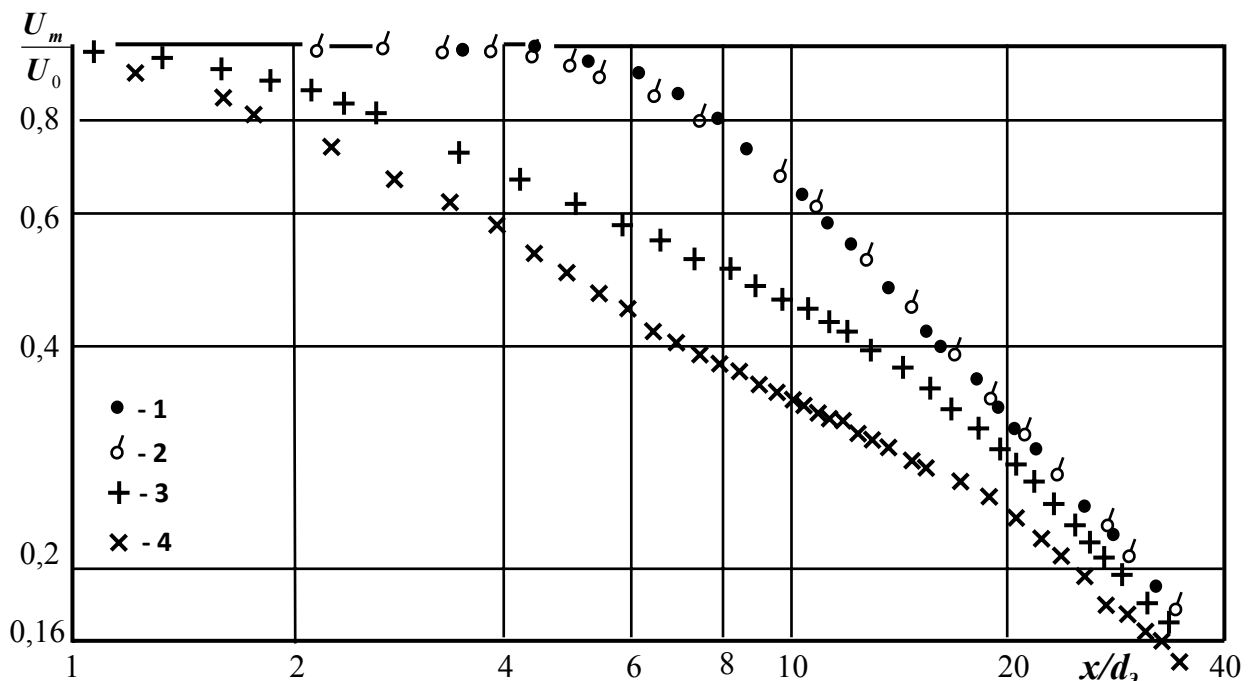


Рисунок 5. Сравнение опытных данных по затуханию осевой скорости трехмерной и осесимметричной струи при  $U_0 = 40$  м/с: 1 – круглое сопло; 2 –  $\lambda = 2,66$ ; 3 – 11; 4 – 25,25.

### Литература

1. Агульков А., Джаугаштин К.Е., Ярин Л.П. Исследование структуры трехмерных турбулентных струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1975. №6. С. 13-21.

2. Уханова Л.Н., Войтович Л.Н. Некоторые особенности развития когерентных структур течения на начальном участке трехмерных турбулентных струй // Инж.-физ. журнал. 1984. Т.47. №4. С. 537-543.
3. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. Изд. 2-ое перераб. и доп. Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука, 1984. 720 с.
4. Крашенинников С.Ю., Рогальская Е.Г. Распространение струй из прямоугольных сопел, свободных и вблизи экрана // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. №4. С. 39-48.
5. Sforza P.M., Trentacoste N. Further experimental results for three – dimensional free jets // AIAA J. 1967. V.5. №5. P. 885-890.
6. Шепелев И.А., Гельман Н.А. Универсальные формулы для расчета скорости и температуры вентиляционных струй, истекающих из прямоугольных отверстий // Водоснабжение и санитарная техника. 1966. №7. С. 19-21.
7. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч I. М.: 1955. 560 с.
8. Mitchell. On the theory of free streamlines // Philosophical Transactions. – 1890. V. 181. Ser. A.
9. 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. 1995.
10. Исатаев С.И., Төлеуов Г., Исатаев М.С., Омйрбеков Ж.О. Исследование средних характеристик течения в трехмерной турбулентной струе // 4-я Международная научная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». Караганда. 2004. С.177-179.

## ҮШӨЛШЕМДІ ТУРБУЛЕНТТІК АҒЫНШАЛАРДЫҢ ОРТАША СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

**С.И. Исатаев, Г. Төлеуов, М.С. Исатаев**

$\lambda$  шамасының өзгеруінің кең обылысында нәтижелерді жалпыламалау мақсатында  $\lambda$ -дан тәуелділікте ағыстың орташа динамикалық сипаттамаларының өзгеруіне қатысты жан-жақты эксперименттік нәтижелер алынды. Үшөлшемді ағыншаны алу үшін алынып-салынатын соплолар қолданылды. Тәжірибеде ұзарулары келесідей болатын соплолар қолданылды:  $\lambda=1; 2,66; 5,07; 7,61; 11; 16; 25,25$  және дөңгелек сопло. Негізгі өлшеулер эффективтік диаметр бойынша есептелген  $3,2 \times 10^4$  және  $6,5 \times 10^4$  Рейнольдс сандарына сәйкес 20 м/с және 40 м/с тең  $U_0$  соплодан шығар жердегі жылдамдықтар кезінде жүргізілді.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THREE-DIMENSIONAL TURBULENT JETS

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

Detailed experimental data on alteration of dynamic characteristics of average flow characteristics depending on  $\lambda$  with the aim of generalization of the results in the extended area of  $\lambda$  value alteration. Replaceable nozzles are applied to form three dimensional streams. The nozzles with the extension  $\lambda=1; 2,66; 5,07; 7,61; 11; 16; 25,25$  and a round nozzle have been applied in the experiments. The main changes have been arranged in the case of flowing velocity at the nozzle exit  $U_0$  equal to 20 m/s and 40 m/s that is equivalent to the Reynolds figures  $3,2 \times 10^4$  and  $6,5 \times 10^4$  calculated on effective diameter.