

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ СОПЛА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ВЫХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

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

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

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

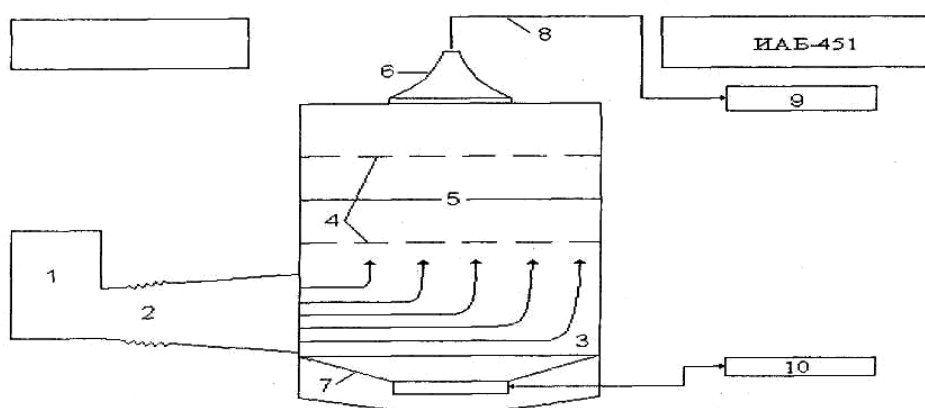
Экспериментальными исследованиями последних лет [1-2] было замечено, что при истечении струи из сопла прямоугольного сечения развиваются профили скорости и температуры с резкими неравномерностями, несмотря на то, что в выходном сечении сопла профили скорости и температуры были равномерными. Дальнейшие исследования показали, что эти неравномерности обусловлены влиянием структуры крупномасштабных вихрей, развивающихся в начальном участке струи. В данной работе приводятся результаты комплексного экспериментального исследования аэродинамики трехмерной турбулентной струи, истекающей из прямоугольного сопла.

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.

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



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

Рис.1. Схема экспериментальной установки

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 пропаявались. Прямоугольные сопла имели одинаковую длину 90 мм, со степенями поджатия ≈ 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 $d_e = 2\sqrt{ab/\pi}$

В опытах использовались сопла с соотношением сторон: $\lambda = 3; 11; 16$ и $25,25$.

Основные измерения проведены при скорости истечения из сопла $U_0 = 20$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $Re = 3,25 \cdot 10^4$, рассчитанного по эффективному диаметру.

С целью выявления закономерности влияния параметра λ на аэродинамику трехмерного течения были измерены поперечные профили средней скорости струй в различных сечениях во взаимно перпендикулярных плоскостях симметрии. На рисунках 2,3,4 и 5 показаны результаты измерений поперечных профилей скорости вдоль осей, параллельных длинной (z) и короткой (y) сторонам выходного сечения сопла, для $\lambda = 3; 11; 16; 25$ при $U_0 = 20$ м/с (на рисунках обозначения означают: U – продольная составляющая скорости, U_0 – скорость на выходном сечении сопла, U_m – максимальная скорость в данном сечении, x – координатная ось вдоль распространения течения, x/b – относительная координата (калибр), $y_{0,5}$ и $z_{0,5}$ – поперечные координаты, где скорость равна половине максимальной ($U_m/2$)). На рисунках y и z отсчитываются от центра струи.

Анализируя результаты исследования, полученные нами, можно сделать несколько заключений.

Во-первых, показано, что автомодельность профилей вдоль оси параллельной короткой стороне устанавливается независимо от λ при $x/b \geq 6$, а вдоль оси, параллельной длинной стороне, скоростные профили переходят к профилям характерным осесимметричной струе при $x/b \geq 20$ для $\lambda = 3$, $x/b \geq 50$ для $\lambda = 11$, $x/b \geq 70$ для $\lambda = 16$ и $x/b \geq 100$ для $\lambda = 25,25$.

Во-вторых, при измерении профилей скорости для $\lambda = 11$ вдоль направления большой оси в переходном участке в профилях скорости наблюдается "седлообразность" формы их распределения. С дальнейшим увеличением значений параметра λ в поперечных профилях скорости по этой же оси число максимумов также увеличивается (например, для $\lambda = 16$ число максимумов равно 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 λ .

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.

Теперь на основе пространственного поведения таких крупномасштабных вихрей, более подробно проведем качественный анализ данных, которые приводились выше.

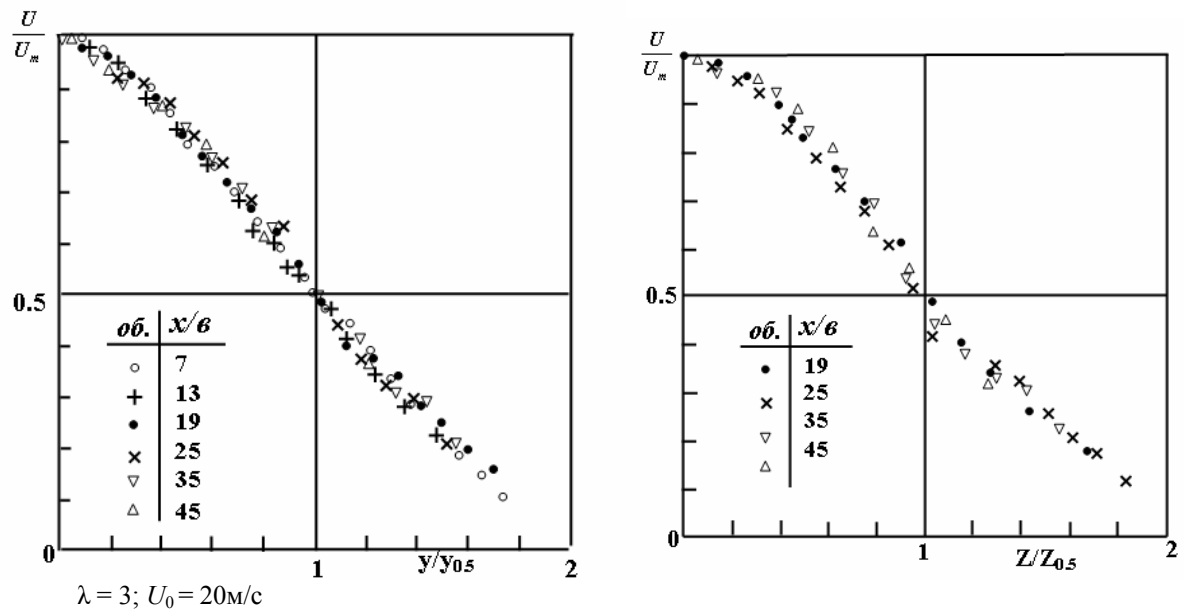


Рис. 2. Безразмерные профили скорости трехмерной струи

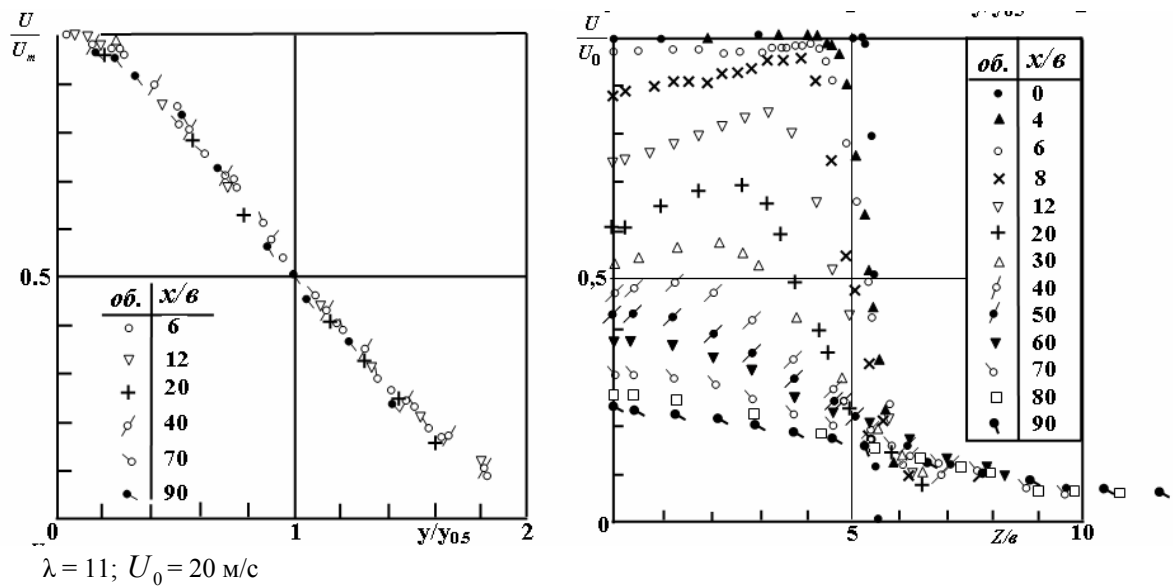


Рис. 3. Безразмерные профили скорости трехмерной струи

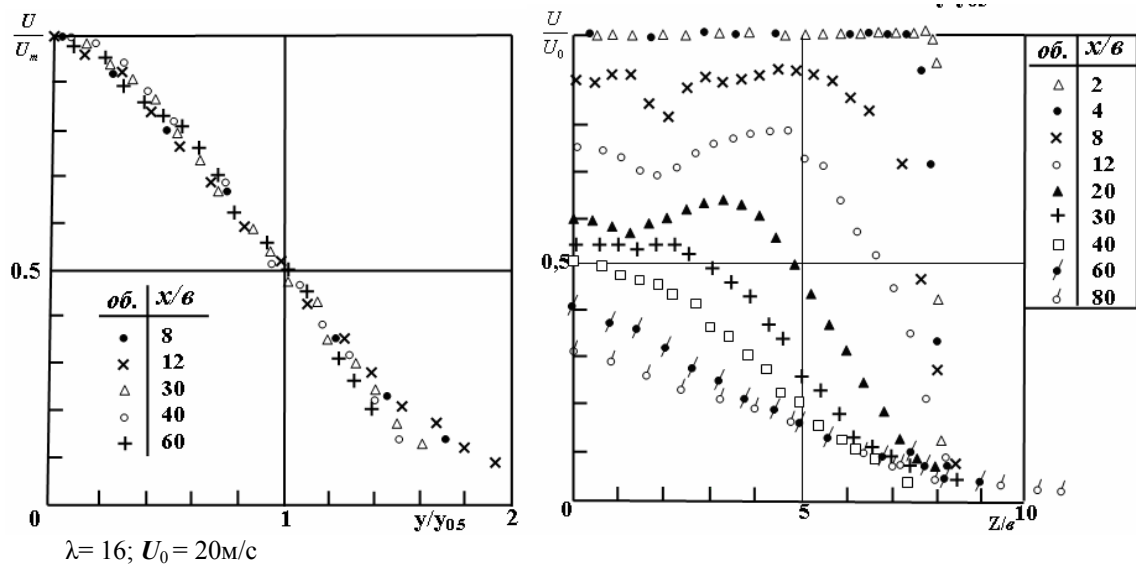


Рис. 4. Безразмерные профили скорости трехмерной струи

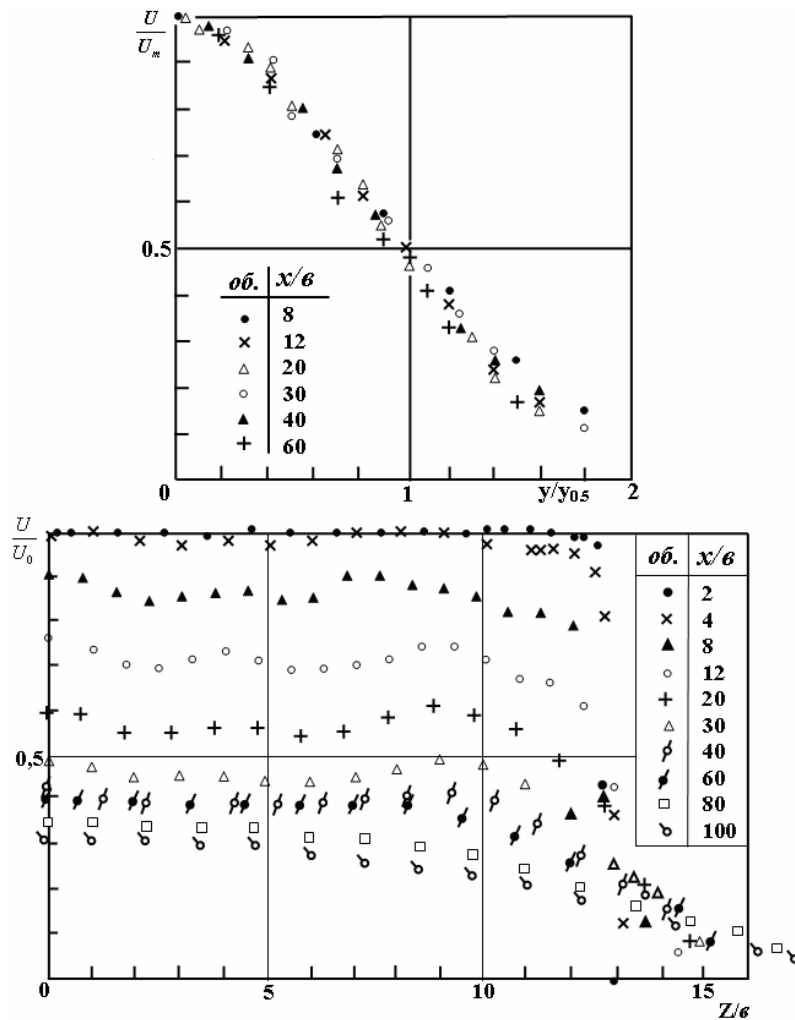


Рис. 5. Безразмерные профили скорости трехмерной струи

В результате исследования визуальной картины течения, а также измерения профилей скорости и температуры были установлены несколько возможных вариантов развития крупномасштабных вихрей в начальном и переходном участках струи.

В первом случае ($1 \leq \lambda \leq 3$) крупномасштабные вихри, образующиеся в начальном участке, замыкаются в виде эллипсоида сами на себя. В этом случае вихри существенно не влияют на профили средней скорости как вдоль оси y , так и вдоль оси z . На рисунке 2 приведены распределения скорости по осям y и z на различных расстояниях от сопла в струе, истекающей из сопла с удлинением $\lambda=3$. Как видно в этом случае профили скорости монотонные.

Во втором случае при значениях $\lambda \geq 10$ движение образовавшихся вдоль кромок длинных вихревых шнуров становятся неустойчивыми и с удалением от сопла могут распасться на несколько вихревых колец по длине сопла вдоль оси z .

В этом случае образуются с удалением от сопла в переходной области струи несколько максимумов и минимумов в профиле скорости вдоль оси z .

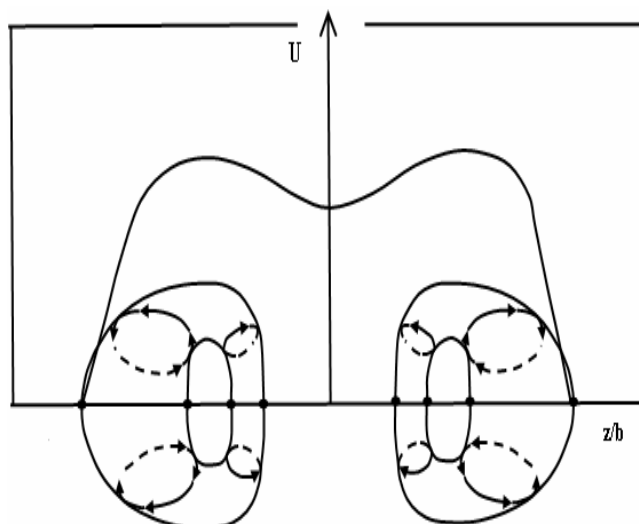
На рисунках 3, 4 и 5 приведены профили скорости в струях, истекающих из сопел с удлинением $\lambda=11$, 16 и 25. Во всех случаях в начальном участке струй образовались несколько замкнутых тороидальных вихрей. В результате их влияния профили скорости по оси z становятся сильно неравномерными уже на расстояниях в несколько калибров (x/b) от среза сопла, хотя на выходе из сопла был равномерный профиль скорости.

При $\lambda=11$ в поперечном сечении может образоваться два тороидальных вихря, в результате чего в профиле скорости по оси z (рисунок 3) образуется в центре минимум, а по краям два максимума скорости. При $\lambda=16$ в начальном участке в место одного длинного тороида образуются три тороидальных вихря, расположенные по оси z в одном сечении струи. Благодаря этому, как показано на рисунке 4 образуются 3 максимума в профиле скорости вдоль оси z . При $\lambda=25$ может образоваться 5 тороидальных вихрей и образуются 5 максимумов в профиле скорости вдоль оси z (рисунок 5).

Ранее отмечалось [3], что 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 сообщается, как на основе этой же схемы удалось объяснить природу возникновения немонотонности в профилях скорости и избыточной температуры струи.

Точно также можно объяснить причину образования неравномерностей в поперечных профилях скоростей (по z) и в данном случае (рисунок 6).

Из анализа результатов наблюдения и фотографирования теневой картинке течения следует, что происходит непрерывная деформация вихревого возмущения, сопровождающейся сложной траекторией сближения и перемикания его частей, развивающихся со стороны коротких и длинных кромок сопла. Наличие минимума U/U_0 (рисунок 6) связано с образованием локализованной области, в которой линейная скорость вихря после завершения процесса перемикания вихревого шнура вблизи оси струи и окончательного формирования вихревого тора направлена против основного потока. В конечном счете, это, и объясняет причину образования неравномерностей в скоростном поле.



$\lambda=11$; $U_0=6$ м/с; $x/b \approx 12$

Рис. 6. Мгновенная картина крупномасштабных вихрей на переходном участке трехмерных струй и их влияние на распределение скорости

Литература

1. Исатаев С.И., Исатаев М.С., Ползик В.В. Влияние ограничивающих торцевых стенок на изменение скорости в плоской турбулентной струе //Вестник Каз.НУ им.аль-Фараби, серия физическая №1(8).-Алматы, 2000. – С. 171 – 176.
2. 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.
3. Исатаев С.И., Тарасов С.Б., Төлеуов Г., Исатаев М.С., Асембаева М.К. Влияние акустического воздействия на динамику трехмерной турбулентной струи //Вестник КазНУ им.Аль-Фараби, серия физическая №1(28).-Алматы, 2009. – С. 73 – 77.

ШЫҒЫС ҚИМАСЫ ТІКТӨРТБҰРЫШТЫ СОПЛОДАН АҒЫП ШЫҒАТЫН ТУРБУЛЕНТТІ ЕРКІН АҒЫНШАНЫ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

С.И. Исатаев, Ф. Төлеуов, М.С. Исатаев

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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TURBULENT FREE JETS FLOWING FROM NOZZLE WITH RECTANGLE OUTFLOW FACE

S. Isatayev, G. Toleuov, M. Isatayev

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 flow characteristics of three-dimensional jets are given.