N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 3, Number 301 (2015), 125 – 131

DYNAMICS OF VORTEX PERTURBATIONS IN INITIAL AND TRANSITION THREE JET REGIONS

S. Isatayev, S. Tarasov, G. Toleuov, M. Isatayev, Sh. Bolysbekova, B. Baygalikyzy

Kazakh national university named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: Muhtar.Isataev@kaznu.kz

Key words: three jet, large-scale vortices, turbulence, Strouhal number.

Abstract. The aim of this work is an experimental study of coherent structures in turbulent mixing processes in the jet streams in order to obtain further control over these processes through its impact on the dynamics of coherent structures.

Extensively studied visual flow pattern, according to the results, it was found that, in the initial stage of vortex perturbation is located along the edge of the nozzle in the form of a cord belting jet in one plane. However, extending the downstream perturbation on the long side of the nozzle gradually lags behind the disturbances on the short side. In this case, the trajectory of the vortex focuses on the short part of the nozzle is directed towards the center of the jet and vortex on the long side - from the center. It is established, at what distance vortices depending on the nozzle extension λ are merged.

Simplified diagram of the formation and decay of vortex structures, made on the basis of observation and photographing shadow flow patterns and to determine the trajectories of vortices tricks, is shown.

УДК 532.525.2

ДИНАМИКА ВИХРЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА НАЧАЛЬНОМ И ПЕРЕХОДНОМ УЧАСТКАХ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУИ

С. И. Исатаев, С. Б. Тарасов, Г. Толеуов, М. С. Исатаев, Ш. А. Болысбекова, Б. Байғалиқызы

Казахский национальный университет им. алъ-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: трехмерная струя, крупномасштабные вихри, турбулентность, число Струхаля.

Аннотация. Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании развития когерентных структур в процессах турбулентного смешения в струйных течениях с целью получения в дальнейшем возможности управления этими процессами через воздействие на динамику когерентных структур.

Подробно изучена визуальная картина течения, по результатам которых было установлено, что в начальной стадии вихревое возмущение располагается вдоль линии кромки сопла в виде шнура, опоясывающего струю в одной плоскости. Однако, распространяясь ниже по потоку, возмущение со стороны длинной стороны сопла постепенно отстает от возмущений со стороны короткой части. При этом траектория движения фокусов вихрей со стороны короткой части сопла направлена к центру струи, а вихрей со стороны длинной части – от центра. Установлено, на каком расстоянии происходит слияние вихрей в зависимости от удлинения сопла λ.

Представлена упрощенная схема формирования и распада вихревых структур, составленная на основе наблюдения и фотографирования теневой картины течения и по определению траекторий фокусов вихрей.

В работах [1-3], 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 $U_m \sim x^{-0.5}$ и основного участка, где $U_m \sim x^{-1}$) и другие проявления струи.

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

Вышеназванные особенности в основном связаны с возникновением и развитием когерентных структур течения [4-6], что является важным объектом для исследования.

Больше возможности для количественной оценки динамики когерентных структур дает метод фазовой выборки [7, 8], позволяющий получить распределения скорости и температуры в поперечном сечении вихря. При совместном использовании данного метода и метода синхронной визуализации импульсным освещением исследуемой области течения удается получить более полное представление о процессах смешения в потоках с периодической структурой.

Данная работа является продолжением серии исследований, направленных на выяснение роли когерентных структур в процессах турбулентного смешения в струйных течениях с целью получения в дальнейшем возможности управления этими процессами через воздействие на динамику когерентных структур.

Эксперименты проводились на установке, схематически показанной на рисунке 1. Воздух от вентилятора 1 поступал через виброгасящий переход 2 в успокоительную камеру 3, затем через нагреватель 4 и сетку 5 истекал из сопла прямоугольной формы 6. Для измерений пульсационных

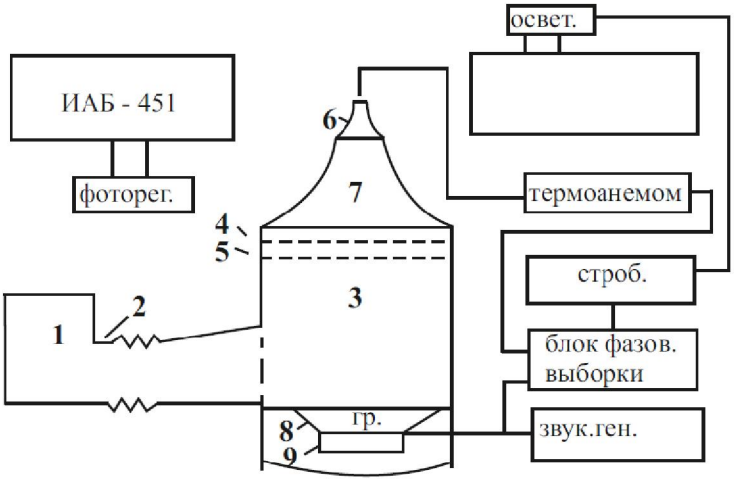

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

характеристик и выделения средней, регулярной и хаотических составляющих пульсаций скорости использовалась система термоанемометрического блока типа СТМ-02. Описание системы и методика измерений приведено в работах [7, 8].

Наблюдение и фотографирование теневой картины течения производилось при слабом нагреве струи по всему сечению, нагреве только стенок сопла или нагреве тонкого нихромового проводника, натянутого вдоль траектории движения вихрей. Первый из трех способов использовался для наблюдения поля течения начального и переходного участков струи и получения предварительной информации о пространственной структуре организованных движений. Второй и третий способы позволяли более точно определить положение фокусов вихрей.

Для получения информации о динамике когерентных структур использовался теневой метод цветной визуализации. Он дает возможность получить более наглядную картину пространственной деформации вихрей в области переориентации формы поперечного сечения в начальном и переходном участках трехмерных струй. Из опробованных способов цветной визуализации наилучшие результаты были получены при использовании трехщелевой диафрагмы с фильтрами основных цветов: красного, зеленого и синего. При настройке фонового поля на белое свечение помимо основных цветов информацию о направлении градиента температуры дают также все промежуточные цвета.

На рисунке 2 показаны результаты экспериментов по определению области наиболее ярко выраженной периодичности течения и числа Струхаля, рассчитанного по характерной частоте этой периодичности. По форме кривой автокорреляции $\overline{U'(t)\cdot U'(t+\tau)}$ определялся полупериод τ_x характерной частоты n_x и амплитуда величины $\overline{U'(t)\cdot U'(t+\tau_x)}$. Из рисунка 2 видно, что наибольшей энергией периодичности обладает течение вблизи $x/d_э$=1,5÷2 ($d_э$ – эффективный диаметр прямоугольного сопла, площадь среза выхода которого для всех сопел примерно одинакова и равновелика по площади круглому соплу, диаметр которого составлял бы $d_{кр}$ = 22,57 мм). Соответствующее ему число Струхаля S=0,74. По форме кривой зависимости числа Струхаля от $x/d_э$, можно сделать вывод, что в области $x/d_э$=1,3÷1,5 происходит первое слияние вихрей, так как значение S уменьшается примерно в 2 раза. Второе слияние заканчивается при $x/d_э$=3, где S уменьшается еще в два раза. Этот процесс подтверждается по наблюдению теневой картины течения.

Пробные опыты по определению частоты наиболее эффективного воздействия показали, что при $n>n_x$ в начальном участке струи стабилизируется развитие более мелких вихрей и эффект от воздействия уменьшается. При $n<n_x$ размер вихрей становится больше и вместе с ним увеличивается расстояние от среза сопла до места их разрушения. Однако заметных изменений в средних характеристиках не наблюдается. Их можно повысить, увеличивая амплитуду воздействия. При этом эффект насыщения наступает при более высокой амплитуде воздействия по сравнению с

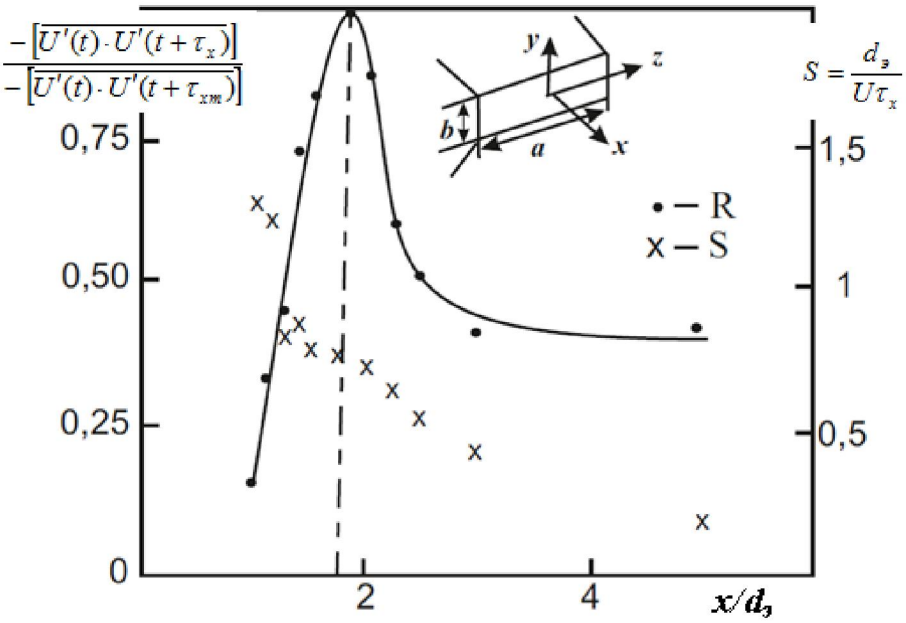

Рисунок 2 – Результаты экспериментов по определению области наиболее ярко выраженной периодичности течения и числа Струхаля, рассчитанного по характерной частоте этой периодичности. Удлинение сопла λ = 3, скорость потока $U0$ = 21.35 м/с

воздействием на частоте n_x. Эффект насыщения, т.е. прекращение изменений, вызванных воздействием при дальнейшем увеличении амплитуды воздействия, обычно реализуется в случае, когда энергия струи намного больше энергии управляющего воздействия. Таким образом, воздействие на частоте n_x является оптимальным, но ограниченно насыщенным. Для практического использования может оказаться более выгодным воздействие на частотах $n<n_x$, если необходим более широкий интервал управления характеристиками струи.

Из наблюдения картины течения при стробоскопическом освещении было выяснено, что в начальной стадии вихревое возмущение располагается вдоль линии кромки сопла в виде шнура, опоясывающего струю в одной плоскости. Однако, распространяясь ниже по потоку, возмущение со стороны длинной стороны сопла постепенно отстает от возмущений со стороны короткой части. При этом траектория движения фокусов вихрей со стороны короткой части сопла направлена к центру струи, а вихрей со стороны длинной части – от центра. С помощью теплеровских импульсных снимков картины течения со стороны длинной и короткой частей сопла при фиксированной фазе развития вихрей, можно достаточно хорошо увидеть это. Достигнув области течения, где завершается переориентация формы поперечного сечения струи, вихри приобретают довольно сложную пространственную форму. Более детально ее удается разглядеть на теневой картине течения в цветном изображении. На рисунке 3 приведены результаты опытов по определению траекторий фокусов вихрей путем наблюдения цветной теневой картины течения при стробоскопическом освещении. Представленные на рисунке 3 данные получены при одинаковом расходе и одном значении числа Струхаля $S_a = n\cdot a/U_0$. Такое представление результатов дает информацию о влиянии удлинения сопла $\lambda=a/b$ на положение места, где вихревые возмущения в поперечном сечении приобретают форму, близкую к квадратной.

Подобную переориентацию длинной и короткой сторон струи можно наблюдать по результатам измерения средних динамических характеристик течения, показанные на рисунке 4 (такие результаты были получены и у других авторов [1]). На рисунке 4 приведены результаты измерений характерных ширин профилей продольной скорости в плоскостях y, z, перпендикулярных оси струи, с осями координат, ориентированными соответственно вдоль малой и большой сторон сопла. Значения $y_{0,5}$ и $z_{0,5}$ соответствуют координатам точек, где скорость $U=0.5U_{max}$. Как показывают результаты, струя быстрее расширяется в сторону коротких сторон среза сопла и на некотором определенном расстоянии от среза сопла ширины струй по осям y и z становятся равными. Из рисунка 4 видно, что эти расстояния для λ=3 и 11 соответственно равны 12 и 50.