

Научная статья

УДК 533.6.011.34+533.6.08

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-34-47

**Применение метода PIV для измерения параметров
пульсаций скорости в слое смешения
дозвуковой затопленной струи**

**Андрей Александрович Пивоваров, Иван Николаевич Кавун
Валерий Иванович Запрягаев, Николай Петрович Киселев**

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

pivovarov@itam.nsc.ru

i_k@itam.nsc.ru

zapr@itam.nsc.ru

nkiselev@itam.nsc.ru

Аннотация

Проведено исследование характеристик пульсаций скорости газового потока в начальном участке дозвуковой турбулентной струи, истекающей в затопленное пространство. Геометрическое число Маха на срезе сопла $M_a = 0,85$. Проведено сравнение данных, полученных с применением бесконтактного панорамного метода PIV, зондирования потока приемником полного давления и численного моделирования. Показана возможность использования метода PIV для оценки параметров пульсаций скорости потока и выявлены некоторые источники появления ошибки измерения.

Ключевые слова

околозвуковая струя, слой смешения, пульсации скорости, метод PIV, численный расчет

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации 124021500011-3) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Механика».

Для цитирования

Пивоваров А. А., Кавун И. Н., Запрягаев В. И., Киселев Н. П. Применение метода PIV для измерения параметров пульсаций скорости в слое смешения дозвуковой затопленной струи // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 3. С. 34–47. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-34-47

Application of Particle Image Velocimetry (PIV) for Velocity Fluctuation Characteristics Measuring in Subsonic Submerged Jet Mixing Layer

Andrey A. Pivovarov, Ivan N. Kavun
Valery I. Zapryagaev, Nikolay P. Kiselev

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

pivovarov@itam.nsc.ru

i_k@itam.nsc.ru

zapr@itam.nsc.ru

nkiselev@itam.nsc.ru

Abstract

Investigation on gas flow velocity pulsations characteristics in subsonic turbulent jet initial section exhausting into a submerged space was conducted. The geometric Mach number at the nozzle exit is $M_a = 0.85$. A comparison between data obtained using the contactless panoramic PIV method, flow probing with a total pressure tube, and numerical modeling was performed. The possibility of using the PIV method to estimate flow velocity pulsations parameters is shown and some sources of measurement error are identified.

Keywords

subsonic jet, mixing layer, velocity pulsations, PIV method, CFD

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124021500011-3). The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Pivovarov A. A., Kavun I. N., Zapryagaev V. I., Kiselev N. P. Application of particle image velocimetry (PIV) for velocity fluctuation characteristics measuring in subsonic submerged jet mixing layer. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 3, p. 34–47. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-34-47

Введение

Изучение характеристик пульсаций в сжимаемых слоях смешения струйных течений актуально при создании авиационных двигателей, эжекторных установок, устройств для уменьшения акустического шума в промышленности и т. п. Известно, что в сдвиговом слое смешения струи достигается максимальный уровень вихревых пульсаций параметров потока [1], которые являются источником акустического шума [2].

Бесконтактное панорамное измерение скорости с помощью метода PIV является перспективным экспериментальным методом в аэрогазодинамике сжимаемых течений. Однако в связи с тем, что метод основан на измерении скорости дисперсной фазы, а не газа, возникает ошибка измерения скорости, которая проявляется также в пульсациях скорости после статистической обработки вследствие скоростного запаздывания частиц в градиентных потоках. Поэтому данные об измеренных методом PIV-пульсациях скорости нуждаются в оценке их достоверности.

Большинство исследований выполнены в основном при скоростях потока до 50 м/с. Например, в работах [3–11] исследования проведены при низких числах Маха ($M < 0,4$), соответствующих дозвуковым несжимаемым течениям. В приведенных работах показано, что метод PIV хорошо зарекомендовал себя как надежный экспериментальный метод для изучения пульсаций. В области сжимаемых течений в до-, транс- и сверхзвуковых потоках ($M > 0,4$) работ достаточно мало. В [12] данные о поле течения и о структуре пульсаций скорости в следе за кососрезным генератором Гартмана в режиме автоколебаний получены с использованием метода PIV. Эксперименты проводились при числе Маха $M = 4,85$, число Рейнольдса – $2,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Показано, что выявленная форма поперечных пульсаций имеет вид наклонных структур в виде волн Маха. В работе [13] представлены данные о характеристиках пульсаций скорости в слое

смешения струи, истекающей из сопла с числом Маха на срезе $M_a = 0,85$, где выявлены некоторые ограничения метода в связи с его недостаточным пространственным разрешением.

При изучении турбулентных пульсаций скорости в слое смешения высокоскоростной струи могут проявляться эффекты, связанные с инерционностью трассерных частиц, вводимых в поток. В [14; 15] показано, что в высокоскоростном градиентном потоке следует выполнять коррекцию измеренных с помощью PIV данных.

Целью работы являлась проверка применимости метода PIV для исследования пульсационных характеристик трансзвуковой струи. Измерения проводились на двух установках, одна из которых была открытого, а вторая – закрытого типа. Также проводилось зондирование потока приемником полного давления, в головной части которого был установлен миниатюрный датчик измерения пульсаций давления. Результаты эксперимента сравнивались с данными численного расчета.

1. Экспериментальное оборудование, методика эксперимента и численного расчета

Эксперименты проведены на Вертикальной струйной установке (ВСУ) и в струйном модуле сверхзвуковой аэродинамической трубы периодического действия Т-326 ИТПМ СО РАН. В первом случае струя истекала в открытое пространство, во втором – в камеру Эйфеля. Такое различие позволяло предположить уменьшенное для первого случая воздействие элементов конструкции установки на исследуемое течение.

Интенсивность пульсаций восстанавливалась по данным измерений полей компонент скорости с использованием метода PIV, а результаты измерений пульсаций полного давления пересчитывались с помощью формул изоэнтропического течения в пульсации скорости.

Экспериментальные результаты дополнены данными численного расчета, выполненного с использованием программного пакета ANSYS Fluent.

1.1. Параметры эксперимента

В экспериментах на ВСУ и струйном модуле Т-326 использовалось одно и то же конвергентное осесимметричное профилированное сопло с диаметром в выходном сечении $D_a = 60$ мм [16], степень поджатия $s = 2,15$. Число Маха на срезе сопла $M_a = 0,85$, число Рейнольдса $Re_D = 1,4 \cdot 10^6$ (определялось по диаметру выходного сечения сопла D_a).

В экспериментах поддерживалось постоянное отношение $N_{pr} = p_0/p_e = 1,6$, где p_0 и p_e – давление в форкамере и в окружающем затопленную струю пространство. Температура окружающего струю воздуха во всех экспериментах $T_e \sim 290$ К.

Так как эксперименты на разных установках при использовании различных методов измерений проводились в разное время, температура в форкамере T_0 и скорость на срезе сопла V_a несколько отличались друг от друга. Температура в форкамере ВСУ составляла при использовании метода PIV $T_0 \sim 295$ К, при зондировании потока датчиком пульсаций полного давления $T_0 \sim 276$ К, в форкамере струйного модуля Т-326 – $T_0 \sim 294$ К.

Вычисленная по значению числа Маха M_a и температуре в форкамере T_0 скорость на срезе сопла равнялась: при зондировании потока $V_a \sim 264,6$ м/с, при использовании метода PIV – $V_a \sim 273,5$ м/с (эксперимент на ВСУ) и $V_a \sim 273,1$ м/с (эксперимент на струйном модуле Т-326).

1.2. Измерение пульсаций скорости

Используемое в эксперименте на струйном модуле Т-326 оборудование и методы измерений описаны в работах [17; 18]. В эксперименте применялась PIV-система Oxford Lasers PIV system DP3D, которая включает в себя следующее оборудование: ND:YAG-лазер с максималь-

ной энергией импульса 300 мДж, длиной волны 532 нм и длительностью 4 нс, CCD-камера PCO SensiCam QE 4,5 с минимальным интервалом между двумя кадрами в режиме двойной экспозиции – 0,5 мкс, блок синхронизации, программное обеспечение по обработке изображений VidPIV.

На установке ВСУ применялся PIV-комплекс фирмы Dantec Dynamics, состоящий из импульсного ND:YAG-лазера, генерирующего два импульса с максимальной энергией 800 мДж, длительностью 4 нс и длиной волны 532 нм, высокоскоростной цифровой камеры Phantom v310 и блока синхронизации. Обработка мгновенных значений скорости осуществлялась с помощью программы по обработке изображений Dynamic Studio.

Для засева потока визуализирующими частицами в обоих экспериментах использовался генератор микрочастиц конденсационного типа [17]. В работе для формирования трассерных визуализирующих частиц использовался разбавленный водой полигликоль. Жидкость поступает из подготовительной емкости в цилиндрический резервуар объемом около двух литров, донная часть которого предварительно нагревается с помощью электрической плиты. Капли жидкости, попадая на горячую поверхность, кипят и испаряются, формируя облако концентрированного пара, импульсно инжектируемого сжатым воздухом через малые отверстия трубки, установленной в форкамере. Пар, охлаждаясь при смешивании с поступающим сжатым воздухом, конденсируется с образованием светорассеивающих жидких частиц – микрокапель полигликоля. В результате истечения парогазовой смеси через сопло происходит формирование двухфазной струи. Согласно [15], размер визуализирующих частиц в экспериментах равнялся примерно одному микрометру.

В плоскости (x, y) определялись поля распределения мгновенных значений модуля вектора скорости V_i и его компонент вдоль осевой V_{xi} и радиальной V_{yi} координат в i -е моменты времени, а также средних значений скорости V , средних квадратических отклонений $\langle V_x' \rangle$ и $\langle V_y' \rangle$ и относительной интенсивности I пульсаций скорости.

Относительная интенсивность пульсаций скорости I в экспериментах, выполненных на установках Т-326 и ВСУ с помощью PIV, определялась величиной

$$I = \frac{\sqrt{\langle V_x' \rangle^2 + \langle V_y' \rangle^2}}{V_a} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{xi}')^2 + \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{yi}')^2}}{V_a}. \quad (1)$$

Здесь $\langle V_x' \rangle$ – среднеквадратичное отклонение x -компоненты скорости V_x' , $\langle V_y' \rangle$ – среднеквадратичное отклонение y -компоненты скорости V_y' , V_a – значение скорости на срезе сопла, определяемое с использованием формул изэнтропического течения по газодинамическим параметрам на входе в сопло.

1.3. Определение пульсаций скорости по измеренным пульсациям полного давления

Пульсации полного давления p_0' измерены зондом, в лобовой части которого установлен датчик динамического давления производства фирмы Kulite хсq-0.93-1,7 с верхним пределом измерения 0,17 МПа и примерным диапазоном измерения пульсаций давления не выше 15–20 кГц. Внешний диаметр оголовка датчика равен 2,4 мм. Для регистрации использовалась четырехканальная аналого-цифровая плата (АЦП) HS4-DIFF-5 фирмы «TiePie engineering». Измерения проводились в поперечных сечениях струи: $x/D_a = 1,5$; 2; 2,5 и 3. В каждом сечении x/D_a зонд дискретно перемещался по заданным координатам в радиальном направлении от внешней к внутренней границе слоя смещения струи, шаг по радиусу составлял 3 мм. В ка-

ждой радиальной позиции зонда проводилась запись трех реализаций по 2^{17} измерений с частотой 200 кГц. Время записи каждой реализации 0,67 секунды.

Полученные значения p_{0i}' пересчитывались с использованием формул для изоэнтропического течения в значения пульсаций осевой компоненты скорости V_x' . Течение считается адиабатическим, температура торможения является постоянной во всем поле течения струи.

Связь полного давления и температуры со скоростью, входящей в число Маха, определяется формулами

$$\frac{p_{0i}'}{p_e} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{xi}^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (2)$$

$$T_0 = T_i \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{xi}^2 \right). \quad (3)$$

Здесь p_{0i}' – измеренное мгновенное значение пульсаций полного давления в заданной точке пространства (x, y) , соответствующее i -му измерению; p_e – статическое давление в окружающем струю пространстве; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты воздуха; M_{xi} – мгновенное значение числа Маха продольной компоненты вектора скорости V_{xi} в заданной точке; T_i – мгновенное значение статической температуры, T_0 – полная температура. Здесь давление p_e и температура T_0 одинаковы для всех i -х значений p_{0i}' , M_{xi} , T_i , что связано с малой частотой измерения этих параметров в эксперименте.

Мгновенная скорость V_{xi} определяется соотношением

$$V_{xi} = M_{xi} \sqrt{\gamma R T_i}. \quad (4)$$

Выражение (4) с учетом (2), (3) принимает вид

$$V_{xi} = \sqrt{\frac{2\gamma R T_0}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_{0i}'} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}. \quad (5)$$

После определения мгновенных значений скорости вычислялись их пульсации и находилась оценка величины относительной интенсивности пульсаций скорости потока I :

$$I = \frac{\sqrt{2 \cdot \langle V_x' \rangle^2}}{V_a} = \frac{\sqrt{2 \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{xi}')^2}}{V_a}. \quad (6)$$

Повышающий коэффициент «2» в (6) выставлен из предположения, что радиальная компонента пульсаций вектора скорости V_y' (которая при зондировании потока не измерялась) по своей величине соизмерима с осевой V_x' .

1.4. Численный расчет

Численный расчет выполнен с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Двумерная осесимметричная расчетная область включала в себя внутрисопловую область и выходное пространство. Расстояние выходных границ от среза сопла – десять диаметров D_a по длине и радиусу. Такая геометрия позволяла пограничному слою на стенке сопла плавно трансфор-

мироваться в слой смешения струи и минимизировать влияние границ области на параметры турбулентного течения в нем.

Рабочее тело струи – совершенный газ (воздух), описывающийся уравнением состояния Менделеева – Клапейрона. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности являются функциями от температуры и рассчитываются по формулам Сазерленда и Эйкена. Уравнения сохранения импульса и энергии включают в себя тензор турбулентных (рейнольдсовых) напряжений. Коэффициент турбулентной вязкости вычисляется с использованием двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности течения $k-\omega$ SST.

Температура воздуха задавалась $T_0 = T_e = 300$ К, вычисленная по значениям M_a и T_0 скорость на срезе сопла $V_a = 275,9$ м/с, давление на входе в сопло $p_0 = 1,6$ атм, давление в окружающем пространстве $p_e = 1$ атм. Условия расчета турбулентных параметров на всех свободных границах расчетной области: интенсивность турбулентности 0,5 %, отношение турбулентной вязкости к молекулярной равно 1.

Относительный уровень пульсаций скорости в программном пакете Fluent определялся как

$$I_{ref} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{V_{ref}}, \quad (7)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия:

$$k = \frac{\langle V_x' \rangle^2 + \langle V_y' \rangle^2}{2}, \quad (8)$$

V_{ref} – скорость, к которой отнесен уровень пульсаций скорости потока. Для приведения (7) в соответствующий формулам (1) и (6) масштаб, в настоящей работе вычислялась относительная интенсивность, также отнесенная к скорости на срезе сопла V_a :

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{ref} = \frac{\sqrt{\langle V_x' \rangle^2 + \langle V_y' \rangle^2}}{V_a}. \quad (9)$$

2. Результаты

2.1. Визуализация околосвуковой струи

Визуализация околосвуковой струи, полученная на двух экспериментальных установках (ВСУ и Т-326) с использованием метода лазерного ножа, представлена на рис. 1. Направление потока слева направо. Изображение, полученное на вертикальном стенде (рис. 1, а), повернуто на 90 градусов. Мгновенные изображения течения, зарегистрированные в случайные моменты времени, сформированы рассеянным светом на инжектируемых в поток микрочастицах. Плоскость лазерного ножа проходит через ось струи.

Видно, что для установки открытого типа (рис. 1, а) наблюдаются более высокие флуктуации плотности визуализирующих частиц по сравнению с аэродинамической установкой закрытого типа (рис. 1, б). Такое отличие может быть связано с разной конструкцией форкамер установок, а также влиянием элементов их конструкции, расположенных в затопленном пространстве.

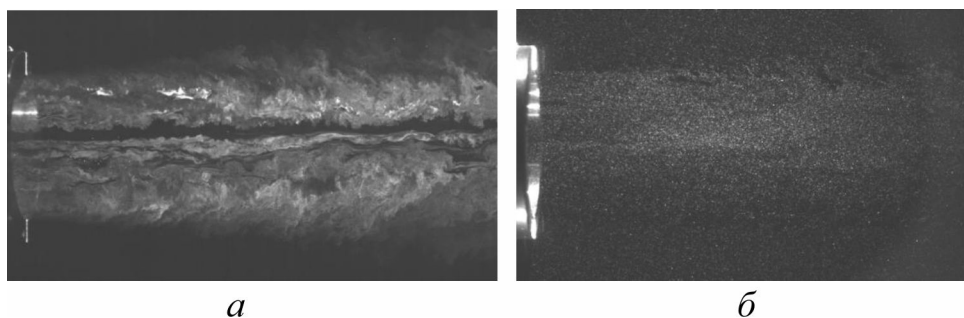


Рис. 1. Визуализация дозвуковой струи (экспозиция 5 нс): *а* – ВСУ, *б* – Т-326
 Fig. 1. Visualization of a subsonic jet (5 ns exposure): *a* – VSU, *б* – T-326

2.2. Изолинии скорости

Изолинии относительной средней скорости струи V/V_a , полученные на двух установках, показаны на рис. 2. Представленные данные получены в результате обработки 1000 пар кадров для Вертикальной струйной установки (рис. 2, *а*) и 500 для струйного модуля Т-326 (рис. 2, *б*). Координата $x/D_a = 0$ соответствует выходному срезу сопла.

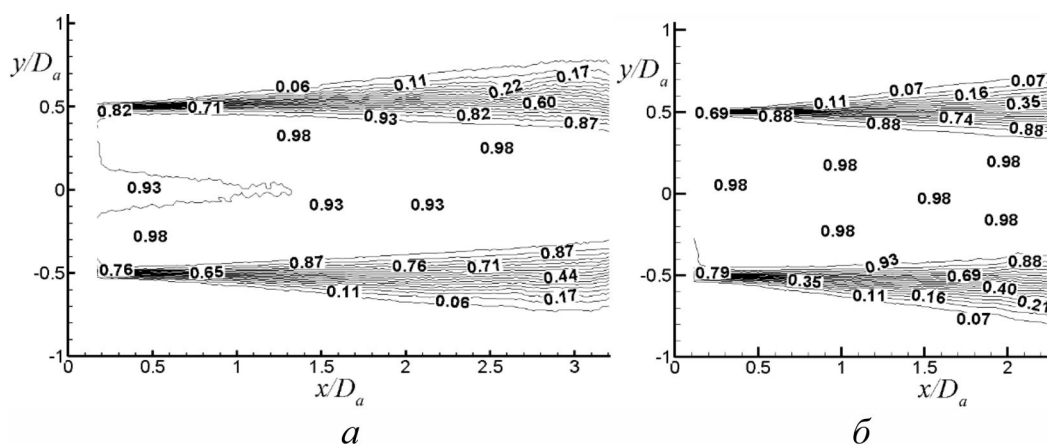


Рис. 2. Изолинии относительной средней скорости V в струе $M_a = 0,85$, ВСУ (*а*) и Т-326 (*б*)
 Fig. 2. Isolines of the relative average velocity V in the jet $M_a = 0,85$, VSU (*а*) and T-326 (*б*)

Видно, что распределения скорости имеют примерно симметричный относительно линии $y/D_a = 0$ вид. Значение скорости в потенциальном ядре потока на срезе сопла не достигает расчетного значения V_a . Согласно [15], временная релаксация частиц в данном случае не должна влиять на результаты измерения скорости методом PIV, поэтому пониженные значения скорости могут быть объяснены наличием потерь полного давления потока, истекающего из сопла, вследствие наличия гидравлических потерь в тракте аэродинамической установки.

При истечении из сопла, установленного на ВСУ (рис. 2, *а*), вблизи его выходного среза регистрируется понижение скорости до $V/V_a = 0,86$ вблизи оси струи в диапазоне $x/D_a = 0,2 - 2,5$, связанное с влиянием конструкции форкамеры этой установки на характер истечения.

Изолинии относительной интенсивности пульсаций скорости I представлены на рис. 3. В ядре струи в приосевой области потока для данных, полученных на ВСУ (рис. 3, *а*), наблюдаются повышенные значения пульсаций ($I = 5-9\%$ от величины скорости течения в выходном сечении сопла V_a), что соотносится с видимой на рис. 2, *а* области пониженного значения

Fig. 3. Isolines of velocity pulsations relative intensity I in the jet $M_a = 0,85$, VSU (a) and T-326 (b)

С другой стороны, слой смешения вблизи среза сопла имеет наименьшую толщину и поэтому в наибольшей степени подвержен возмущениям, действующим на него как изнутри соп-

ла, так и из внешнего затопленного пространства, что также может привести к повышенному уровню пульсаций в этой области течения. В этом случае можно также ожидать заметный вклад радиальных пульсаций скорости в общий уровень интенсивности, что датчик давления, ориентированный вдоль осевого направления, может не регистрировать.

2.3. Радиальные профили

Радиальные профили относительной средней скорости и относительной интенсивности пульсаций скорости, полученные в сечениях струи $x/D_a = 0,5$ и 2 на двух установках с помощью метода PIV, представлены на рис. 4. Сечение $x/D_a = 0,5$ позволяет более подробно рассмотреть особенности течения, вызванные влиянием установок разного типа на процесс развития слоя смешения. Сечение $x/D_a = 2$ находится за областью регистрируемого начального повышенного уровня пульсаций. В этом случае течение в слое смешения становится автомодельным по осевой координате, и появляется возможность сравнения между собой значений уровня пульсаций, получаемых различными методами.

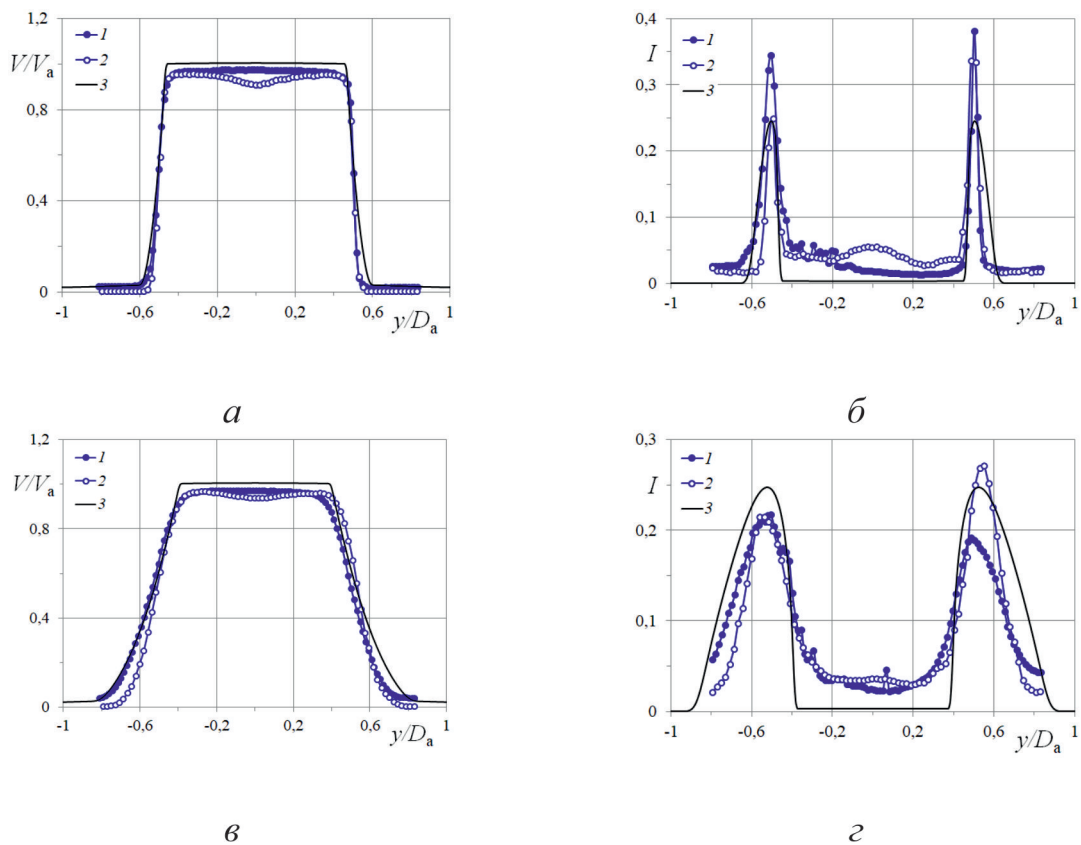


Рис. 4. Поперечные профили относительной средней скорости V (слева) и относительная интенсивность пульсаций скорости I (справа): $x/D_a = 0,5$ (а), (б), и 2 (в), (г); 1 – Т-326, 2 – ВСУ, 3 – численный расчет

Fig. 4. Transverse profiles of relative average velocity V (left) and relative intensity of velocity pulsations I (right): $x/D_a = 0,5$ (a), (b), and 2 (v), (z); 1 – T-326, 2 – VSU, 3 – numerical calculation

Основные различия в профилях средней скорости (рис. 4, а, в) заключаются в характере течения в ядре струи, толщине слоя смешения и смещения профилей друг относительно друга. Пониженные экспериментально полученные значения относительной средней скорости в области ядра потока по сравнению с данными численного расчета обусловлены потерями полно-

го давления в подводящем к соплу тракте аэродинамических установок. Видно, что наблюдаемый на рис. 2, а дефект скорости продолжает существовать и далее вниз по потоку.

Малые ненулевые значения скорости ($V/V_a = 0,02-0,05$) в окружающем струю пространстве ($y/D_a = \pm 0,7-0,8$, поз. 1), полученные в эксперименте на струйном модуле Т-326, обусловлены эжекцией газа из камеры Эйфеля исследуемой струей.

Измеренный на струйном модуле Т-326 (1, рис. 4, в) профиль средней скорости несколько смещен в отрицательную область относительно профиля, измеренного на ВСУ, что связано с отклонением визуализирующих микрочастиц от первоначального направления движения под действием силы тяжести.

Кроме того, в обоих случаях наблюдаются различия профиля измеренной средней скорости в периферийной области слоя смешения от расчетной, что требует более детального исследования.

Распределения интенсивности пульсаций для обеих установок имеют заметно несимметричный вид (рис. 4, б, в) с примерно сходной, хотя и различающейся от максимума к максимуму, интенсивностью. Основные различия также заключаются в различном характере течения в ядре струи, толщине слоя смешения и смещения профилей друг относительно друга.

Также можно отметить, что в сечении $x/D_a = 0,5$ максимальный уровень пульсаций I несколько выше, а в сечении $x/D_a = 2$ не достигает уровня (0,26–0,29), обычно приводимого в литературе для слоя смешения дозвуковой турбулентной струи.

Кроме того, как и для средней скорости, в периферийной области слоя смешения также наблюдаются заниженные уровни измеренных пульсаций скорости по сравнению с расчетной величиной.

Более детальное сравнение данных интенсивности пульсаций скорости I , полученных в слое смешения струи, по данным эксперимента (зондирование потока датчиком пульсаций полного давления 1, измерения методом PIV 2, 3) и численного расчета 4 в сечениях $x/D_a = 1,5$ и 2 представлено на рис. 5. Кривая 1 получена преобразованием измеренных пульсаций полного давления p_0' в удвоенные пульсации скорости V_x' с помощью формул (2) – (6).

Линии, соответствующие позициям 2, 3, с индексом «+» и «-» построены по данным, находящимся по разные стороны от оси симметрии потока $y/D_a = 0$.

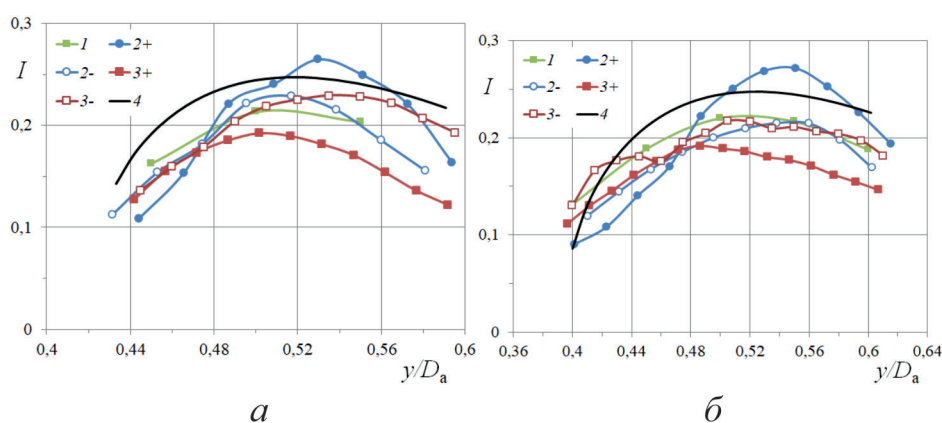


Рис. 5. Распределение интенсивности пульсаций скорости: $x/D_a = 1,5$ (а) и 2 (б); 1 – пересчет пульсаций давления, полученный на ВСУ, 2+ – метод PIV на ВСУ, 3+, 3– – метод PIV на Т-326, 4 – численный расчет.

Координата $y/D_a = 0,5$ соответствует серединам слоев смешения по обе стороны от оси струи $y/D_a = 0$

Fig. 5. Velocity pulsations intensity distribution I : $x/D_a = 1,5$ (a) and 2 (б); 1 – pressure pulsations recalculation obtained on the VSU, 2+, 2– – method PIV on VSU, 3+, 3– – method PIV on T-326, 4 – numerical calculation. The coordinate $y/D_a = 0,5$ corresponds to the middles of the mixing layers on both sides of the jet axis $y/D_a = 0$

Видно, что экспериментальные данные, полученные методом PIV, за исключением некоторых точек на линии 2+, находятся ниже расчетной кривой 4. Этот результат согласуется с исходным предположением о влиянии инерционности трассерных визуализирующих частиц на результаты измерения. Пульсации скоростного напора, действующего на частицы, имеют недостаточную по сравнению с силой инерции величину, чтобы мгновенно изменить их скорость. В этом случае частицы могут иметь среднюю скорость, близкую к средней скорости течения, и заниженный (по данным эксперимента отличие до двух раз) уровень ее мгновенных изменений по сравнению с пульсациями скорости газового потока.

Проверить это предположение можно с помощью сравнения мгновенных значений скорости, регистрируемых методом PIV и датчиком пульсаций полного давления. Гистограммы распределения мгновенных скоростей V' , восстановленных по результатам измерений датчиком пульсаций полного давления на ВСУ (кривая 1) и измеренных с помощью метода PIV в Т-326 (кривая 2), представлены на рис. 6, величина n_i/N равна отношению суммы мгновенных значений n_i для каждого диапазона к общему числу измерений N . На рис. 6, а приведены данные, полученные вблизи внутренней границы слоя смешения, на рис. 6, б – в условной середине слоя смешения и на рис. 6, в – в окрестности внешней границы струи.

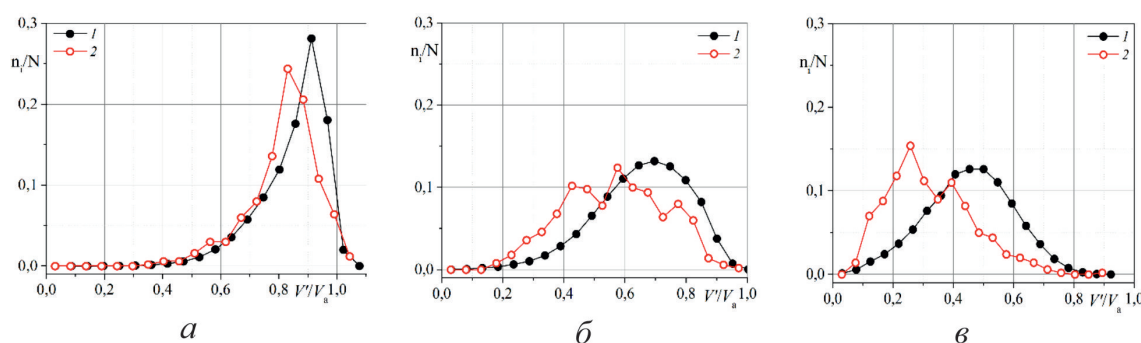


Рис. 6. Гистограммы распределения относительных мгновенных скоростей в сечении $x/D_a = 1,5$ при $y/D_a = 0,45$ (а), 0,5 (б) и 0,55 (в), полученные преобразованием пульсаций полного давления 1 и метода PIV 2

Fig. 6. Histograms of relative instantaneous velocities distribution in the section $x/D_a = 1,5$ at $y/D_a = 0,45$ (а), 0,5 (б) and 0,55 (в), obtained by transforming the total pressure pulsations (1) and the PIV method (2)

Наиболее близкое соответствие гистограмм, построенных по результатам измерений методом PIV и пересчетом данных зондирования потока датчиком пульсаций давления, наблюдается во внутренней части слоя смешения (рис. 6, а), среднее – в середине слоя (рис. 6, б), наименьшее – во внешней его части (рис. 6, в). Различия в положении максимумов распределений мгновенных значений скорости составляют соответственно 9, 24 и 38 %.

Наблюдаемый результат согласуется с величиной скоростного напора в различных струйках тока слоя смешения – чем дальше струйка от потенциального ядра, тем напор меньше. В этом случае его малые относительные изменения (пульсации) становятся в периферийной области слоя смешения недостаточными, чтобы трассерные частицы успевали на них отреагировать.

Заключение

Получены данные о параметрах пульсаций скорости в слое смешения затопленной дозвуковой струи, истекающей из сопла при числе Маха $M_a = 0,85$, на двух экспериментальных установках. Показана применимость метода PIV для определения уровня среднеквадратичных пульсаций скорости. С помощью метода выявлены особенности течения, характерные для разных газодинамических установок.

Установлено, что определение пульсаций скорости методом PIV может сопровождаться появлением существенных погрешностей измерения. Их появление связано с эффектом скоростной релаксации частиц, т. е. недостаточной величиной ускорения относительно массивных микрокапель жидкости под действием относительно слабого скоростного напора. При этом погрешность измерения пульсаций скорости тем выше, чем меньше средняя скорость потока.

Список литературы

1. **Абрамович Г. Н., Гришович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П.** Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984.
2. **Кузнецов В. М.** Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 1. С. 91–102.
3. **Батура Н. И., Гаджимагомедов Г. Г., Масленников Г. Я.** Исследование влияния вихрегенераторов на пульсации слоя смещения струи в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью // XII Всеросс. съезд по фундамент. пробл. теорет. и прикл. мех.: сб. трудов. 2019. Т. 2. С. 500–502.
4. **Гольцман А. Е., Давлетшин И. А., Паерелий А. А.** PIV-метод для исследования структуры пульсирующего течения в гладком канале // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 3. С. 367–374.
5. **Терехов В. И., Стародумова Д. Ю., Шаров К. А.** Измерение системой PIV средних и пульсационных скоростей в газодапельной струе с низкой концентрацией дисперсной фазы // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 427–434.
6. **McCormick F., Gibeau B., Ghaemi S.** Reactive control of velocity fluctuations using an active deformable surface and real-time PIV // J. Fluid Mech. 2024. Vol. 985 (A9). P. 1–43.
7. **Nakamura Y., Chinen M., Sakakibara M., Miyagawa K.** Influence of pulsating flow on turbine performance investigated by DES and PIV // Proc. of the ASME 5th Joint US-European engineering division summer meeting (FEDSM2018), July 15-20, Montreal, Quebec, Canada. 2018.
8. **Murugan S., Huang R. F., Hsu C. M.** Effect of annular flow pulsation on flow and mixing characteristics of double concentric jets at low central jet Reynolds number // Int. J. Mech. Sciences. 2020. Vol. 186. P. 1–16.
9. **Sultan Q., Lalizel G., Fenot M., Dorignac E.** Influence of coolant jet pulsation on the convective film cooling of an adiabatic wall // Transactions of the ASME. 2017. Vol. 139. 022201–12.
10. **Manovski P., Rowin W. A., Ng H., Gulotta P., Giacobello M., de Silva C., Hutchins N., Marusic I.** The spectral response of time-resolved PIV in a turbulent boundary layer // Exp. in Fluids. 2025. Vol. 66(134). P. 1–26.
11. **Yadav H., Srivastava A., Agrawal A.** Characterization of pulsating submerged jet – a particle image velocimetry study // J. Thermal Science and Engin. App. 2016. Vol. 8. 011014–9.
12. **Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Маркович Д. М., Маслов А. А., Поливанов П. А., Цырюльников И. С., Ярославцев М. И.** Применение лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС» для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 343–352.
13. **Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Pivovarov A. A.** Pulsations parameters in the mixing layer of high-speed subsonic jet // AIP Conference Proceedings of the XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020), November 1-7, 2020, Novosibirsk, Russia. Vol. 2351. No. 1. -S.l.: AIP Publishing, 2021. -040051(7) p.
14. **Бойко В. М., Пивоваров А. А., Поплавский С. В.** Измерение скорости газа в высокोगradientном потоке по скорости трассирующих частиц // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 5. С. 49–54.

15. Бойко В. М., Запрягаев В. И., Пивоваров А. А., Поплавский С. В. Коррекция данных PIV для восстановления скорости газа в сверхзвуковой недорасширенной струе // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 5. С. 87–97.
16. Запрягаев В. И., Кавун И. Н., Рыбак С. П., Пивоваров А. А. Определение параметров трансзвукового течения в следе за конусом // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 6. С. 31–42.
17. Бойко В. М., Достовалов А. В., Запрягаев В. И., Кавун И. Н., Киселев Н. П., Пивоваров А. А. Исследование структуры сверхзвуковых неизобарических струй // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 2010. Т. 41, № 2. С. 44–58.
18. Запрягаев В. И., Киселев Н. П., Пивоваров А. А. Газодинамическая структура осесимметричной сверхзвуковой недорасширенной струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 1. С. 95–107.
19. Крашенинников С. Ю., Семенов П. А. Анализ характеристик пульсационного движения в турбулентной струе в процессах смешения и шумообразования // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 4. С. 26–40.
20. Губанов Д. А., Дядькин А. А., Запрягаев В. И. и др. Экспериментальное исследование влияния шероховатости сопла на параметры течения в слое смешения осесимметричной высокоскоростной дозвуковой струи // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 2. С. 42–50.

References

1. Abramovich G. N., Grishovich T. A., Krashennnikov S. Yu., Sekundov A. N., Smirnova I. P. *Theory of Turbulent Jets* (Nauka, Moscow, 1984), 716 p.
2. Kuznetsov V. M. The way to decrease efficiently the noises generated by the jets of passenger aircrafts. *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 85–95.
3. Batura N. I., Gadzhimagomedov G. G., Maslennikov G. Ya. Investigation of vortex generators influence on jet mixing layer pulsations in the wind tunnel with an open test section. *Proceedings of the XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, vol. 2., pp. 500–502.
4. Goltsman A. E., Davletshin I. A., Paereliy A. A. PIV method for research of the structure of pulsating flow in a smooth duct. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 359–366.
5. Terekhov V. I., Starodumova D. Yu., Sharov K. A. PIV measurement of mean and pulsating velocities in a gas-droplet jet with low concentration of dispersed phase. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 401–407.
6. McCormick F., Gibeau B., Ghaemi S. Reactive control of velocity fluctuations using an active deformable surface and real-time PIV. *J. Fluid Mech.*, 2024, vol. 985 (A9), pp. 1–43.
7. Nakamura Y., Chinen M., Sakakibara M., Miyagawa K. Influence of pulsating flow on turbine performance investigated by DES and PIV. *Proceedings of the ASME 5th Joint US-European engineering division summer meeting (FEDSM2018), Montreal, Quebec, Canada, July 15–20, 2018*.
8. Murugan S., Huang R. F., Hsu C. M. Effect of annular flow pulsation on flow and mixing characteristics of double concentric jets at low central jet Reynolds number. *Int. J. Mech. Sciences*, 2020, vol. 186, pp. 1–16.
9. Sultan Q., Lalizel G., Fenot M., Dorignac E. Influence of coolant jet pulsation on the convective film cooling of an adiabatic wall. *Transactions of the ASME*, 2017, vol. 139, 022201–12.
10. Manovski P., Rowin W. A., Ng H., Gulotta P., Giacobello M., de Silva C., Hutchins N., Marusic I. The spectral response of time-resolved PIV in a turbulent boundary layer. *Exp. in Fluids*, 2025, vol. 66(134), pp. 1–26.

11. **Yadav H., Srivastava A., Agrawal A.** Characterization of pulsating submerged jet – a particle image velocimetry study. *J. Thermal Science and Engin. App.*, 2016, vol. 8, 011014-9.
12. **Akhmetbekov Y. K., Bilsky A. V., Markovich D. M., Maslov A. A., Polivanov P. A., Tsiryul'nikov I. S., Yaroslavl'tsev M. I.** Application of "POLIS" PIV system for measurement of velocity fields in a supersonic flow of the wind tunnels. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 325–333.
13. **Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Pivovarov A. A.** Pulsations parameters in the mixing layer of high-speed subsonic jet. *AIP Conference Proceedings of the XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020), Novosibirsk, Russia, November 1-7. 2020. vol. 2351, no. 1, -S.I.: AIP Publishing, 2021, 040051(7) p.*
14. **Boiko V. M., Pivovarov A. A., Poplavski S. V.** Measurement of gas velocity in a high-gradient flow, based on velocity of tracer particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 548–554.
15. **Boiko V. M., Zapryagaev V. I., Pivovarov A. A., Poplavski S. V.** Correction of PIV data for reconstruction of the gas velocity in a supersonic underexpanded jet. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 587–596.
16. **Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Rybak S. P., Pivovarov A. A.** Reconstruction of transonic flow parameters in the cone wake. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2022, vol. 63, no. 6, pp. 940–949.
17. **Boiko V. M., Dostovalov A. V., Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Kiselev N. P., Pivovarov A. A.** Investigation of the structure of supersonic non-isobaric jets. *Uchen. Zap. Tsentr. Aerogidrodinam. Inst.*, 2010, vol. 41, no. 2, pp. 44–58.
18. **Zapryagaev V. I., Kiselev N. P., Pivovarov A. A.** Gasdynamic structure of an axisymmetric supersonic underexpanded jet. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 1, pp. 87–97.
19. **Krasheninnikov S. Yu., Semenev P. A.** Analysis of the fluctuating flow parameters in a turbulent jet in mixing and noise formation processes. *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 4, pp. 444–458.
20. **Gubanov D. A., Dyad'kin A. A., Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Rybak S. P.** Experimental investigation of the nozzle roughness effect on the flow parameters in the mixing layer of an axisymmetric subsonic high-velocity jet. *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, no. 2, pp. 185–193.

Сведения об авторах

Пивоваров Андрей Александрович, младший научный сотрудник

Кавун Иван Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Запругаев Валерий Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник

Киселев Николай Петрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Andrey A. Pivovarov, Junior Scientist

Ivan N. Kavun, PhD (Physics and Mathematics), Senior Scientist

Valery I. Zapryagaev, Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist

Nikolay P. Kiselev, PhD (Physics and Mathematics), Senior Scientist

Статья поступила в редакцию 24.11.2025;

одобрена после рецензирования 29.11.2025; принята к публикации 12.12.2025

The article was submitted 24.11.2025;

approved after reviewing 29.11.2025; accepted for publication 12.12.2025