

И. К. Кабардин¹✉, А. Д. Ротарь¹, В. Г. Меледин¹, К. С. Зубанов¹

Исследование распределения скорости из сопла Витошинского методом лазерной доплеровской анемометрии

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. В работе исследованы аэродинамические характеристики шести сопел Витошинского, изготовленных различными технологиями: фрезерованием, 3D-печатью и профессиональным методом. Цель исследования – оценить влияние способа изготовления на качество формирования струи с использованием лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Измерения скорости глицериновых частиц проводились на расстоянии 3 мм от среза сопла с применением лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07Т и прецизионного координатного устройства. Для сравнительного анализа использовалась ширина плато скоростного профиля – участка, где скорость остается близкой к максимальной (в пределах $\pm 2\%$). Установлено, что референсное сопло обеспечивает наибольшую ширину профиля (8,0 мм), что свидетельствует о его высокой эффективности в формировании устойчивого потока. Сопла, изготовленные фрезерованием, показали значения от 6,8 до 3,9 мм. Пластиковые сопла, произведенные на 3D-принтере, имеют ширину профиля 4,7 и 4,5 мм, что делает их приемлемым вариантом при ограниченном бюджете. Результаты подтверждают важность технологии изготовления для получения стабильного ударного профиля скорости. Полученные данные позволяют рекомендовать типы сопел в зависимости от требований к точности и доступных ресурсов. Работа демонстрирует применимость ЛДА для оценки качества потока и может быть использована при подготовке экспериментальных исследований в области гидро- и аэродинамики.

Ключевые слова: сопло Витошинского, ЛДА, среднее значение скорости, пульсации скорости

I. K. Kabardin¹✉, A. D. Rotar¹, V. G. Meledin¹, K. S. Zubanov¹

Study of velocity distribution from vitoshinsky nozzle by laser doppler anemometry method

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The paper studies the aerodynamic characteristics of six Vitoshinsky nozzles manufactured using different technologies: milling, 3D printing and a professional method. The aim of the study is to evaluate the influence of the manufacturing method on the quality of jet formation using laser Doppler anemometry (LDA). The velocity of glycerol particles was measured at a distance of 3 mm from the nozzle exit using a LAD-07T laser Doppler anemometer and a precision coordinate device. For comparative analysis, the width of the velocity profile plateau was used - a section where the velocity remains close to the maximum (within $\pm 2\%$). It was found that the reference nozzle provides the largest profile width (8.0 mm), which indicates its high efficiency in forming a stable flow. Nozzles manufactured by milling showed values from 6.8 to 3.9 mm. The 3D printed plastic nozzles have a profile width of 4.7 and 4.5 mm, making them an acceptable option for budget-conscious individuals. The results confirm the importance of manufacturing technology for obtaining a stable impact velocity profile. The obtained data allow recommending nozzle types depending on the accuracy re-

quirements and available resources. The work demonstrates the applicability of LDA for flow quality assessment and can be used in the preparation of experimental studies in the field of hydro- and aerodynamics.

Keywords: Vitoshinsky nozzle, LDA, average speed value, speed pulsations

Введение

Данная работа посвящена исследованию скорости струи, истекающей из сопла Витошинского, методом лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА).

Изучение характеристик газовых и жидкостных струй имеет важное значение в аэродинамике, энергетике, ракетной технике и других областях. Одним из ключевых параметров является скорость истечения, от которой зависят динамические и энергетические характеристики потока. Метод лазерной доплеровской анемометрии широко применяется для бесконтактного и высокоточного измерения скоростей в различных средах, что делает его эффективным инструментом для подобных исследований.

Несмотря на существующие работы, посвященные измерениям в струйных течениях, вопросы, связанные с особенностями использования ЛДА для анализа сопел специфической геометрии, требуют дополнительного изучения. В частности, сопло Витошинского обладает уникальными характеристиками, влияющими на структуру струи, что обуславливает необходимость экспериментального исследования его параметров.

Целью данной работы является определение скорости струи, формируемой соплом Витошинского, с помощью лазерной доплеровской анемометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Изучить принцип работы лазерного доплеровского анемометра и его применение для измерения скорости в струйных течениях.
2. Описать особенности конструкции сопла Витошинского и его влияние на формирование струи.
3. Провести экспериментальные измерения скорости струи с использованием ЛДА.
4. Оценить пригодность различных сопел для различных экспериментов.

Работа имеет практическую значимость, так как полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов, связанных с истечением газовых потоков в технических устройствах.

Описание метода

Для исследования характеристик газожидкостных потоков, в частности скорости истечения струи из сопла Витошинского, в данной работе применяется метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Этот метод основан на анализе доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися частицами-трассерами в исследуемом потоке [1].

В используемой измерительной системе ЛАД-0xx реализована дифференциальная схема измерений, где два когерентных лазерных пучка с длиной волны

$\lambda = 532$ нм пересекаются в контролируемой области, образуя интерференционную картину с известным пространственным периодом:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = 7,5^\circ$ – угол между оптическими осями пучков, что обеспечивает чувствительность системы в диапазоне скоростей от 0,05 до 80 м/с с погрешностью не более 0,5% для продольных компонент скорости [2].

При прохождении частицы-трассера через измерительный объем возникает доплеровский сигнал, частота которого определяется выражением:

$$FD = \frac{v}{\Lambda} \cos \varphi = \frac{2v}{\lambda} \sin \alpha \cos \varphi, \quad (2)$$

где v – скорость частицы; φ – угол между вектором скорости и направлением чувствительности системы.

Для обеспечения трехкомпонентных измерений в работе используется схема с двумя двухкомпонентными ЛДА, развернутыми относительно друг друга на угол $8^\circ \pm 2^\circ$ на специальной юстировочной платформе.

Особенностью применяемой методики является использование адаптивной временной селекции сигналов, что позволяет:

- 1) повысить отношение сигнал/шум на 15-20 дБ по сравнению с традиционными схемами;
- 2) обеспечить надежное детектирование сигналов в условиях обратного светорассеяния;
- 3) минимизировать взаимное влияние измерительных каналов [1].

Система регистрирует три составляющих доплеровского сигнала: низкочастотный «пьедестал», связанный с общим уровнем рассеяния, а также квадратурные синусную и косинусную компоненты, несущие информацию о частоте и фазе сигнала. Для обработки данных применяется специализированное программное обеспечение, включающее алгоритмы цифровой фильтрации (вейвлет-анализ), методы спектрального анализа (БПФ с окном Ханна) и процедуры статистической обработки (расчет средних значений, турбулентных пульсаций). Точность измерений обеспечивается использованием FPGA-процессоров для обработки сигналов в реальном времени, системой температурной стабилизации лазерных диодов и автоматической коррекцией коэффициентов усиления фотоприемников.

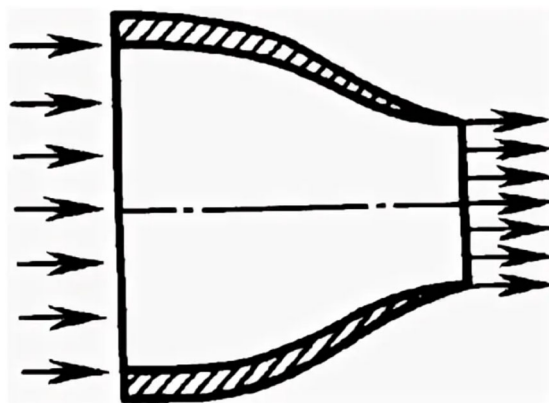


Рис. 1. Устройство сопла Витошинского

Сопло Витошинского [3] представляет собой профилированный канал с особым законом изменения площади поперечного сечения, обеспечивающим эффективное преобразование тепловой энергии газа в кинетическую энергию направленного потока. Его отличительной особенностью является специально рассчитанная форма, которая позволяет получать стабильные сверхзвуковые струи с минимальными волновыми потерями при переходе через скорость звука (критическое сечение). Конструкция сопла обеспечивает формирование ламинарного ядра потока с углом раскрытия струи около 12° для воздуха, что делает его особенно полезным для исследований в аэродинамике и газовой динамике.

Экспериментальная часть

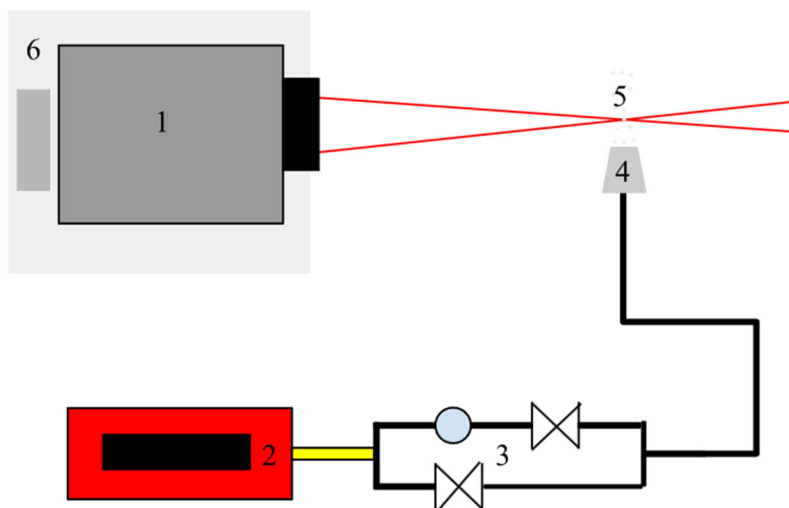


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – измеритель скорости лазерный доплеровский ЛАД-0хх, 2 – компрессор, 3 – источник частиц глицерина, 4 – образец сопла Витошинского, 5 – поток частиц, 6 – координатное устройство

В ходе эксперимента последовательно исследовались шесть различных сопел Витошинского, каждое из которых поочередно устанавливалось в испыта-

тельный стенд. Для каждого сопла проводился независимый цикл измерений: после монтажа конкретного образца выполнялись замеры скорости частиц глицерина на заданных расстояниях от среза (3, 10, 20, 30, 40 и 50 мм) с использованием лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07т. Анемометр был закреплен на прецизионном координатном устройстве, обеспечивающем точность позиционирования по трем осям. Для каждого положения измерения предварительно выполнялась юстировка системы, контролировались параметры подачи глицериновых частиц и поддерживались постоянные условия эксперимента.

Первый эксперимент проводился для сопла, сделанного профессионалами, его можно использовать как референсное. Были получены результаты измерения профиля скорости, приведенные на рис 3.

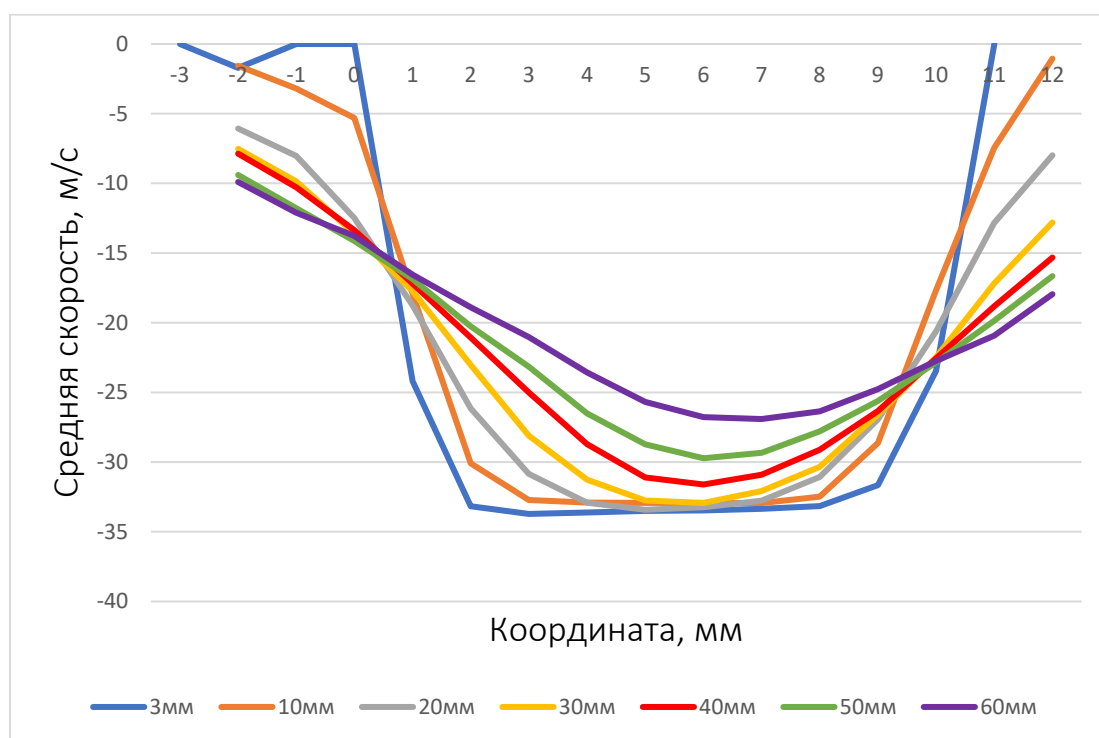


Рис.3. Профили струй из референсного сопла на разных расстояниях

Из рис. 3. видно, что ударный профиль сохраняется только вблизи среза сопла, что соответствует ламинарному истечению, дальше 3 мм от среза профиль все больше приобретает форму, характерную для свободной струи. Поэтому дальнейший анализ результатов был ограничен изучением характеристик потока именно вблизи среза сопла – на расстоянии 3 мм, где можно однозначно оценить влияние конструкции сопла на качество формируемой струи. Измерения на более удаленных расстояниях не представляют практической ценности в рамках данного исследования, так как теряется информативность относительно начальных условий истечения.

Были проведены серии экспериментов для каждого из сопел, пример полученных данных для референсного сопла представлен на рис. 4.

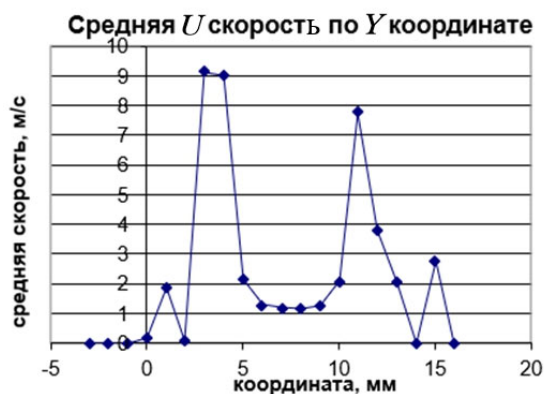
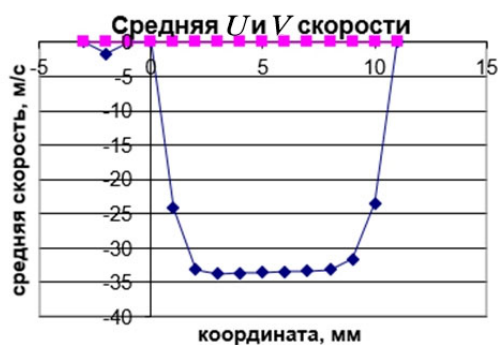


Рис. 4. Пример данных референсного сопла с фотографиями

Для каждого сопла была получена зависимость скорости частиц глицерина от поперечной координаты в ближней зоне истечения. Все графики скоростных профилей были нормированы и наложены на один график (рис. 5) для наглядного сравнения. Анализ графиков показал, что все сопла формируют выраженный ударный профиль вблизи среза, однако его ширина и равномерность зависят от качества изготовления. Результаты измерений ширины ударного профиля для всех исследуемых сопел представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные ширины профиля различных сопел

Сопло	Ширина профиля
1- референсное	8,0 мм
2- фрезерованное1	7,2 мм
3- фрезерованное2	5,0 мм
4- фрезерованное3	3,9 мм
5- из пластика	4,7 мм
6- из пластика	4,5 мм

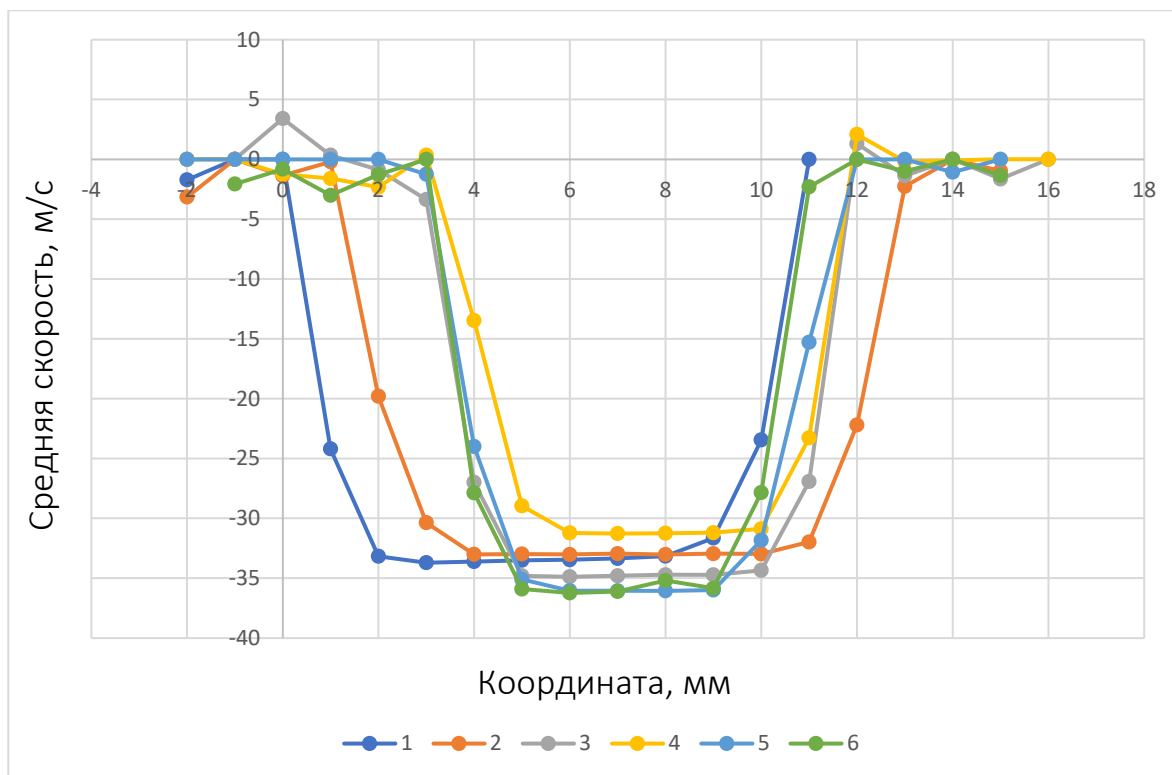


Рис.5. Профили истечения струй из сопел на расстоянии 3 мм от среза: 1 – референсное; 2 – фрезерованное1; 3 – фрезерованное2; 4 – фрезерованное3 (с особенностью, есть дефект производства); 5 – из пластика, 6 – из пластика (с особенностью, есть дефект производства)

Для количественной оценки качества формирования струи был проведен анализ ширины плато скоростного профиля – то есть участка, где скорость остается близкой к максимальной (в пределах $\pm 2\%$ от максимума). Такой подход позволил определить протяженность области, в которой поток сохраняет устойчивую структуру без значительных завихрений или рассеивания.

На основании проведенных измерений ширины скоростного профиля у шести различных сопел Витошинского установлено, что референсное сопло обеспечивает наибольшую ширину плато – 8,0 мм, что свидетельствует о его высокой аэродинамической эффективности и способности формировать устойчивый поток. С увеличением точности изготовления (фрезерованные сопла) ширина профиля уменьшается от 7,2 мм до 3,9 мм, демонстрируя снижение качества потока, учитывая, что ширину профиля 3,9 мм имеет сопло с дефектом производства. Пластиковые сопла, изготовленные на 3D-принтере, показали промежуточные значения – 4,7 мм и 4,5 мм, что указывает на их работоспособность, но с меньшей стабильностью потока.

Таким образом, выбор сопла зависит от требований к точности: для экспериментов с высокой воспроизводимостью предпочтительнее использовать референсное или фрезерованные сопла, тогда как пластиковые могут применяться при ограниченном бюджете и менее жестких требованиях к качеству потока. По-

лученные данные подтверждают важность технологии изготовления сопла в формировании устойчивого ударного профиля скорости.

Заключение

В ходе работы было проведено экспериментальное исследование шести сопел Витошинского с использованием лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07Т. Измерения скорости частиц глицерина проводились на фиксированных расстояниях от среза сопла, что позволило оценить аэродинамические характеристики каждого образца. Установлено, что сопла, изготовленные на 3D-принтере, показали вполне удовлетворительные результаты и могут быть рекомендованы при ограниченном бюджете. При этом профессионально изготовленные сопла обеспечивают более стабильный и однородный поток, что важно для высокоточных измерений. Выбор типа сопла должен определяться задачами эксперимента и доступными ресурсами. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что пластиковые сопла являются приемлемым вариантом в случае, если к точности не предъявляются жесткие требования. Таким образом, исследование подтверждает возможность использования экономичных решений в научных и учебных задачах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121032200034-4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ЛАД-0хх: измерители скорости лазерные доплеровские. Руководство по эксплуатации / ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий». — Новосибирск, 2023.
2. Наумов И.В., Бакакин Г.В., Меледин В.Г. и др. Лазерная доплеровская анемометрия в задачах тепломассопереноса и турбулентности: препринт № 2-1059 / Институт теплофизики СО РАН. — Новосибирск, 2020.
3. Кузнецов А. Г., Смирнов Н. Н. Сопловые устройства в аэродинамических испытаниях: справочное издание. — Санкт-Петербург: Политехника, 2017. — 320 с.

© И. К. Кабардин, А. Д. Ротарь, В. Г. Меледин, К. С. Зубанов, 2025