

УДК 536.24

Исследование поля скорости дозвуковой затопленной воздушной струи

Загайнов Иван Алексеевич^{1, 2(*)}

iz1721@mail.ru

Егоров Кирилл Сергеевич²

egorovks@power.bmstu.ru

SPIN-код: 5503-4995

Попович Сергей Станиславович¹

pss@imec.msu.ru

SPIN-код: 1192-7384

¹ НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Экспериментальное исследование дозвуковых затопленных струй актуально ввиду широкого распространения турбулентных струй в технике и природных процессах. Их характеристики определяют эффективность систем вентиляции, охлаждения, энергетических и аэрокосмических установок. Актуальность работы связана с исследованием устройства энергоразделения Гартмана — Шпренгера. Экспериментальный стенд выполнен на базе малой аэродинамической установки с регулируемыми параметрами подачи газа. Для диагностики применялись ИК-термография (InfraTEC IR8800) и метод PIV с использованием Nd:YAG-лазера. Проведена серия экспериментов в дозвуковых струях, выполнен сравнительный анализ трассеров (TiO_2 и DEHS) для PIV-измерений.

Ключевые слова: энергоразделение, эффект Гартмана — Шпренгера, струйное течение, дозвуковой поток

Investigation of the velocity field of a subsonic submerged jet

Zagainov Ivan Alekseyevich^{1, 2(*)}

iz1721@mail.ru

Egorov Kirill Sergeevich²

egorovks@power.bmstu.ru

SPIN-code: 5503-4995

Popovich Sergey Stanislavovich¹

pss@imec.msu.ru

SPIN-code: 1192-7384

¹ Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia² BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The experimental investigation of subsonic submerged jets is of considerable significance due to the widespread occurrence of turbulent jets in engineering applications and natural processes. The jet characteristics govern the performance and efficiency of ventilation and cooling systems, as well as energy and aerospace devices. The relevance of the present study is determined by its focus on the Hartmann — Sprenger energy-separation device. The experimental facility was developed on the basis of a small-scale aerodynamic installation equipped with adjustable operating parameters and a controlled gas supply system. Diagnostic techniques included infrared thermography (InfraTEC IR8800) and particle image velocimetry (PIV) employing an Nd:YAG laser. A series of ex-

periments on subsonic jets was conducted, and a comparative assessment of tracers (TiO_2 and DEHS) for PIV measurements was carried out.

Keywords: *experimental study, energy separation, Hartmann — Sprenger effect*

Дозвуковые затопленные воздушные струи широко используются в инженерной практике и встречаются природных процессах — от систем вентиляции, охлаждения и подачи воздуха в камерах сгорания до локальной вытяжной и газоочистной аппаратуры, где они служат основным средством переноса импульса, массы и тепла. Поле скорости струи определяет развитие сдвиговой зоны и турбулентных структур, а также существенно влияет на устойчивость горения, распределение температуры и акустические характеристики потока. Экспериментальные и численные исследования поля скорости необходимы для валидации турбулентных моделей и предсказательных CFD-методов, оптимизации геометрии сопел и систем управления потоком, а также для количественной оценки энергоэффективности и экологических рисков. Поэтому детальная пространственно-временная характеристика средних и флуктуационных компонент поля скорости струи при различных числах Рейнольдса и условиях ограниченного или свободного внешнего потока является ключевой задачей для повышения точности инженерных прогнозов и совершенствования проектных решений. Исследование динамики воздушных струй представляет собой важный шаг к пониманию процессов неравновесного обмена энергией в газовых потоках, что непосредственно связано с эффектами энергоразделения, реализуемыми, в частности в трубе Гартмана — Шпренгера.

Под термином «энергоразделение» или «безмашинное энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой [1–3]. Причины, вызывающие энергоразделение потока, могут быть различными. В некоторых случаях это вихревые течения, в других случаях это связано с пульсациями давления и возникновением ударных волн [4–6]. Они легли в основу устройств для энергоразделения потока. Наиболее распространенные среди них — вихревые трубы Ранка — Хилша (ТРХ) и резонансные трубы Гартмана — Шпренгера (ТГШ).

Принцип действия трубы Гартмана — Шпренгера основан на взаимодействии ударной волны со стенками резонатора, что приводит к формированию устойчивой высокоамплитудной волновой структуры и периодическим колебаниям давления [7]. Энергоразделение на основе эффекта Гартмана — Шпренгера реализуется за счет неравномерного распределения энергии в потоке после резонатора, что позволяет выделить зоны с различными уровнями температуры и давления.

Для проведения исследования разработан экспериментальный стенд на базе малой аэродинамической установки непрерывного действия с регулируемыми геометрическими параметрами (диаметр резонатора, длина, форма сопла) и системой подачи газа с регулируемым давлением и скоростью потока (рис. 1) [8, 9]. Установка оснащена как прозрачными окнами из оргстекла,

так и ИК-прозрачным иллюминатором из ZnSe, что позволяет измерять температуру модели с помощью ИК-камеры InfraTEC IR8800. Для экспериментального исследования поля скорости потока в дозвуковых и сверхзвуковых струях применяется система PIV на базе измерительного комплекса «Полис» [10, 11].

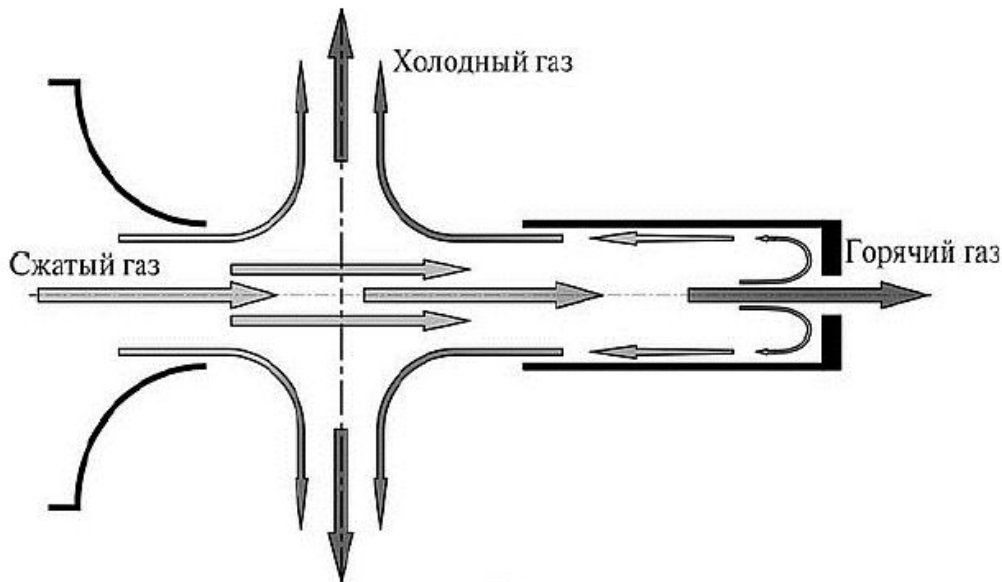


Рис. 1. Устройство для безмашинного энергоразделения на основе трубы Гартмана — Шпренгера

Использование автоматических систем позиционирования измерительных зондов (температуры, давления), а также средств бесконтактной термометрии позволяют фиксировать с высокой точностью и хорошим пространственным разрешением параметры, характеризующие энергоразделение газового потока. При этом будет получена подробная информация по распределению статического и полного давления вдоль канала, о профилях скорости на выходе из канала, о температурном поле при различных расходах рабочего тела. На основе полученных данных будут определены режимы, при которых энергоразделение имеет максимальное значение. Относительная простота рабочего участка и универсальная измерительная база дает возможность в кратчайшее время модернизировать стенд с целью более тщательного исследования фиксируемых эффектов. Для подсветки потока в системе PIV используется зеленый импульсный ND:YAG лазер Beamtech Vlite 200 с двумя рабочими элементами и одним общим оптическим выходом.

В рамках первой части работы проведена серия экспериментов по исследованию структуры течения в дозвуковой струе, а также сравнительный анализ применимости различных типов трассеров на базе оксида титана и маслокапельной жидкости DEHS [12–14]. Получены векторы продольной составляющей скорости (рис. 2). Трассеры вводятся в поток перед соплом, давление воздуха от трассы высокого давления регулируется с помощью редуктора. Давление и температура торможения измеряются перед входом в сопло.

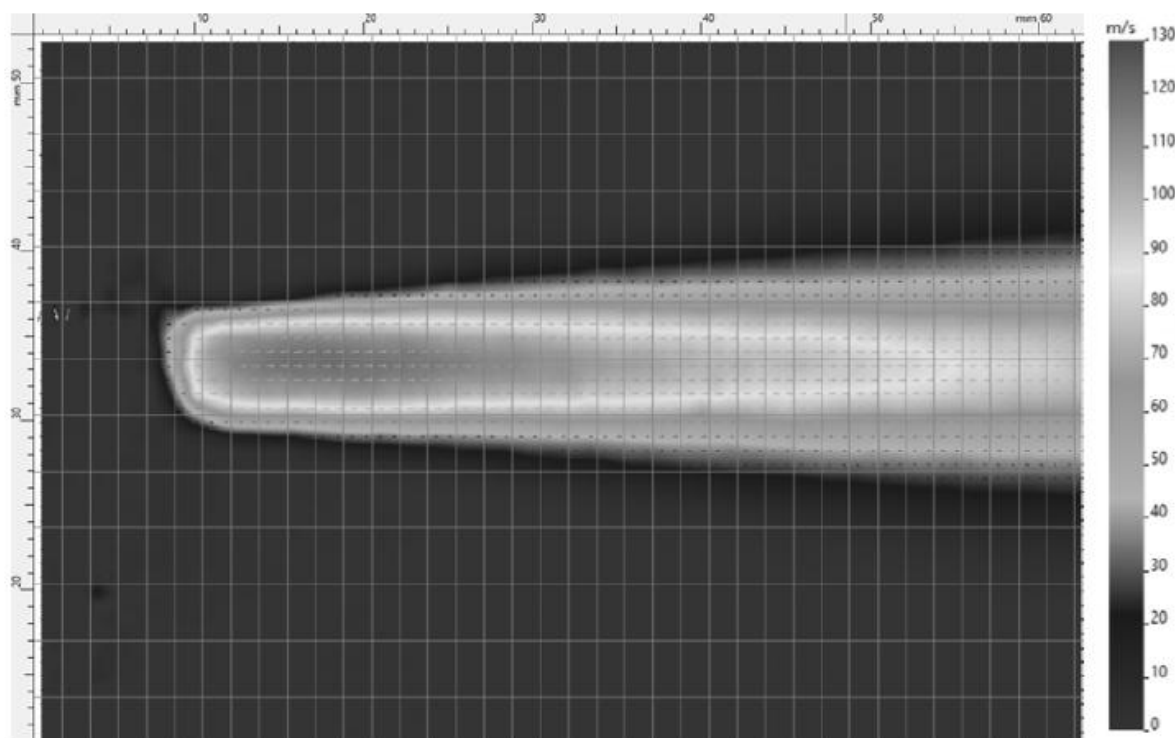


Рис. 2. Векторы продольной составляющей скорости

*Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики
МГУ им. М.В. Ломоносова (№ АААА-А19-119012990115-5).*

Список источников

- [1] Виноградов Ю.А., Попович С.С., Леонтьев А.И., Стронгин М.М. Влияние локального отрывного течения за преградой в сверхзвуковом потоке на эффективность устройства безмашинного энергоразделения. *Будущее машиностроения России. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 274–277.
- [2] Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое. *Теплофизика высоких температур*, 2022, т. 60, № 3, с. 455–480.
- [3] Здитовец А.Г., Попович С.С., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование способов безмашинного энергоразделения однофазного сжимаемого потока. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2024, т. 25, № 6, с. 1–30.
- [4] Попович С.С. *Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016, 172 с.
- [5] Попович С.С., Знаменская И.А., Муратов М.И., Загайнов И.А. Исследование взаимодействия ударной волны с турбулентным пограничным слоем оптическими методами. *Научная визуализация*, 2025, т. 17, № 3, с. 67–76.
- [6] Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A. Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction. *Acta Astronautica*, 2025, vol. 229, pp. 804–813.
- [7] Raman G., Srinivasan K. The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 97–123.

- [8] Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа. *Программная инженерия*, 2018, т. 9, № 1, с. 35–45.
- [9] Козлов П.В., Попович С.С., Здитовец А.Г., Загайнов И.А. Экспериментальное исследование тепловых потоков в газодинамических установках непрерывного и кратковременного действия. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2024, т. 25, № 6, с. 239–251.
- [10] Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. Экспериментальная отработка панорамного метода исследования анемометрии по изображениям частиц на сверхзвуковой аэродинамической установке. *Будущее машиностроения России. X Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 12–16.
- [11] Загайнов И.А., Попович С.С., Егоров К.С. Экспериментальная отработка методов измерения поля скорости в потоке сжимаемого газа. *Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность. XXV Междунар. конф.: матер.* Москва, Издательство Московского университета, 2024, с. 92–93.
- [12] Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. Сравнительное исследование применимости различных видов трассеров засева потока системы PIV при сверхзвуковых скоростях. *Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева: тез. докл.* Казань, АО Информационно-издательский центр, 2023, с. 406–407.
- [13] Загайнов И.А., Попович С.С., Егоров К.С. Отработка методики засева сверхзвукового потока различными типами трассеров PIV-системы. *Фундаментальные и прикладные задачи механики. Междунар. науч. конф.: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 255.
- [14] Загайнов И.А., Попович С.С., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А. Практика применения различных типов трассеров для исследования газовых потоков методом анемометрии по изображениям частиц. *Ломоносовские чтения-2024. Всерос. конф. с междунар. уч.: тез. докл.* Москва, Изд-во Московского университета, 2024, с. 62.