

УДК 533.697/.9

Экспериментальное исследование возбуждения поперечной струи в сверхзвуковом потоке в присутствии периодических искровых разрядов

Волков Лука Сергеевич^(*)

volkov.ls@phystech.su

SPIN-код: 6849-7037

Мирошников Яков Владиславович

qugelmeister@gmail.com

SPIN-код: 3754-5806

Трошкин Роман Сергеевич

troshkinrs@gmail.com

SPIN-код: 5839-6604

Фирсов Александр Александрович

firsov@jiht.ru

SPIN-код: 8206-2534

ОИВТ РАН, Москва, Россия

Аннотация. Проведены эксперименты по искусственной генерации возмущений на границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке путем зажигания периодических искровых разрядов на стенке с наветренной стороны от инжектора струи. Получены высокоскоростные теневые видеозаписи течения с разрядами и без разрядов. Выявлен отклик течения на искровые разряды, который заключается в формировании крупных возмущений (поперечных вихрей) и в изменении характерных частот этих возмущений в зависимости от частоты разрядов.

Ключевые слова: искровой разряд, сверхзвуковой поток, струя, смешение, SPOD

Введение. В настоящее время активно развиваются исследования новых способов интенсификации смешения газов в высокоскоростных потоках [1]. Задача смешения часто рассматривается на примере поперечной вторичной струи в сверхзвуковом потоке. В недавних работах [2, 3] были предприняты попытки перемешивания газов в высокоскоростных потоках с помощью искровых разрядов. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование струи, поперечно инжектируемой в сверхзвуковой поток через отверстие на стенке, в присутствии периодических искровых разрядов с целью выявления отклика струи на воздействие искрового разряда и способности разрядов возбуждать возмущения в струе.

Методы и материалы; результаты. Эксперименты были проведены на аэродинамической трубе ИАДТ-50 в ОИВТ РАН с параметрами $P_{st} = 22$ кПа, $T_0 = 300$ К, $M = 2$. Вторичная струя (CO_2) подавалась через отверстие с диаметром $D = 3$ мм с массовым расходом от 2 до 4 г/с. Разряды с энергией ~ 20 мДж и частотой от 7 до 10 кГц зажигались между плоскими электродами перед струей на расстоянии 3 мм от центра инжектора. Производилась теневая съемка с частотой 160 тыс. кадров в секунду и разрешением 126×96 пикселей для случаев с разрядами и без разрядов. По отдельным областям видеозаписей были построены периодограммы яркости. Затем видеозаписи были обработаны методом спектрального собственного ортогонального разложе-

ния (SPOD) [4], это позволило визуализировать области, в которых наблюдаются пульсации на той или иной частоте.

Показано, что при малом значении коэффициента динамического напора $J \sim 0,6$ искровые разряды вызывают формирование крупных возмущений (вихрей) в сдвиговом слое на границе струи. При большем значении $J \sim 1-1,3$ такие возмущения возникают самостоятельно (на частоте $\sim 40-50$ кГц); при наличии разрядов цикл формирования этих возмущений оказывается синхронизован с разрядами. В обоих случаях разряды оказывают существенное влияние на спектр SPOD-разложения теневой видеозаписи.

Заключение. Таким образом, с помощью высокоскоростной теневой съемки удалось исследовать частоты возмущений в течении с поперечной струей в сверхзвуковом потоке при наличии периодических искровых разрядов с разными частотами. Результаты хорошо согласуются с проведенным ранее моделированием [3]. Часть результатов опубликована в работе [5]. Полученные данные будут использованы для анализа физических механизмов интенсификации перемешивания газов в сверхзвуковом потоке с помощью электрических разрядов. Работы по SPOD-анализу поддержаны государственным заданием.

Список источников

- [1] Sun M., Wang H., Xiao F. *Jet in Supersonic Crossflow*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019, 284 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6025-1>
- [2] Wang H. et al. Mechanism of a transverse jet mixing enhanced by high-frequency plasma energy deposition. *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, no. 9, art. no. 096101. <https://doi.org/10.1063/5.0162441>
- [3] Волков Л.С., Фирсов А.А. Моделирование влияния импульсно-периодического нагрева на формирование возмущений на границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2023, т. 15, № 4, с. 845–860. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2023-15-4-845-860>
- [4] Schmidt O.T., Colonius T. Guide to Spectral Proper Orthogonal Decomposition. *AIAA Journal*, 2020, vol. 58, no. 3, pp. 1023–1033. <https://doi.org/10.2514/1.J058809>
- [5] Волков Л.С., Селивонин И.В., Фирсов А.А. Экспериментальное и численное исследование управления возмущениями на границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке с помощью искрового разряда. *Теплофизика высоких температур*, 2025, т. 63, № 1, с. 24–31. <https://doi.org/10.31857/S0040364425010045>