03

Выбор критерия эффективности перемешивания газов на примере поперечной струи в сверхзвуковом потоке в присутствии искровых разрядов

© Л.С. Волков, А.А. Фирсов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: volkov.ls@phystech.su

Поступило в Редакцию 28 октября 2025 г.
В окончательной редакции 22 декабря 2025 г.
Принято к публикации 22 декабря 2025 г.

Проведено сравнение четырех критериев перемешивания газов. Сравнение осуществлялось на примере данных, полученных численным моделированием поперечной околозвуковой струи газа в сверхзвуковом потоке воздуха в присутствии искровых разрядов. Исследованы взаимосвязь критериев и их поведение в зависимости от структуры течения. Показано, что мгновенные значения критериев не связаны напрямую, однако при осреднении по времени в большинстве случаев дают согласующиеся между собой результаты, что позволяет выбрать приемлемый критерий в экспериментальных исследованиях.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, инжекция, смешение, искровой разряд.

DOI: 10.21883/0000000000

Поперечная вторичная околозвуковая струя, инжектируемая в сверхзвуковой поток воздуха через отверстие на плоской стенке, — одна из стандартных конфигураций течения, на примере которых исследуются способы интенсификации перемешивания газов в условиях сверхзвукового потока [1]. Исследование новых способов быстрого перемешивания газов (например, топлива с воздухом) — актуальная задача для усовершенствования камер сгорания со сверхзвуковым потоком на входе [2]. Об этом свидетельствует большое разнообразие предлагаемых стратегий перемешивания: например, за счет подбора оптимальных параметров струи для случаев разной геометрической конфигурации сверхзвукового тракта [3,4], модуляции расхода газа [5] и использования других активных методов [6].

В настоящее время в расчетных работах, как правило, используется следующий интегральный критерий эффективности перемешивания струи с потоком [1]:

$$\eta_m(\rho, U, W) = \frac{\int W_r \rho U dA}{\int W \rho U dA}, \ W_r = \min\left\{W, W_{st}\frac{1-W}{1-W_{st}}\right\}. \quad (1)$$

Интегралы берутся по некоторой плоскости, перпендикулярной потоку, W — массовая доля газа струи, U — продольная компонента скорости, ρ — плотность, W_{st} — массовая доля газа струи в стехиометрической смеси, W_r — массовая доля топлива, способного прореагировать с воздухом в пределах некоторого элементарного объема.

Так, $\eta_m = 0$ означает отсутствие перемешивания, а $\eta_m = 1$ означает отсутствие областей с богатой топливно-воздушной смесью (что впрочем не исключает наличия областей с бедной смесью). В [7] показано, что в случае горения η_m коррелирует с коэффициентом сгорания топлива. В [8] отмечено, что важно подставлять в (1) мгновенные величины, а не осредненные, поскольку скорость горения определяется мгновенной концентрацией веществ в каждой точке.

Однако в экспериментах η_m не применяется, поскольку он требует измерения скорости, плотности и химического состава смеси в большом количестве точек. В работах, посвященных струям в сверхзвуковом и дозвуковом потоке, можно встретить косвенные способы количественного описания перемешивания. Например, в [9] измеряется площадь поперечного сечения засеянной струи, подсвеченной лазерным ножом. Таким же способом в [10,11] была визуализирована и представлена в явном виде на рисунках граница струи в заданных плоскостях, что делает возможным нахождение длины этой границы. В работе [12] методом планарной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) исследовано мгновенное распределение концентрации вещества струи, построены поля и профили концентрации. Снижение концентрации косвенно свидетельствует об улучшении смешения.

В настоящее время остается неизученной связь между интегральным критерием (1) и более простыми критериями, потенциально применимыми в экспериментах.

Цель настоящей работы — сравнить несколько критериев перемешивания газов на примере конкретных нестационарных данных, полученных путем численного моделирования, и таким образом определить, какие критерии наилучшим образом соответствуют (1) и какие они имеют преимущества и недостатки для их применения в экспериментальных исследованиях. Сравнение производится двумя способами. Сначала сравниваются значения критериев как функций времени для одного набора нестационарных данных. Затем сравниваются

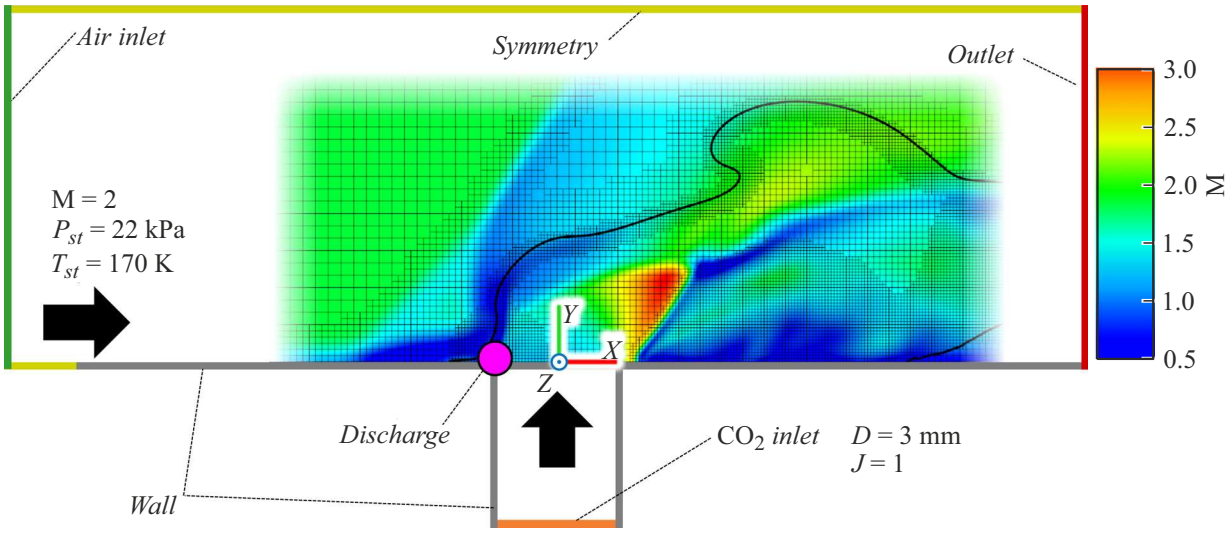

Рис. 1. Расчетная область, граничные условия и местоположение источника тепла, моделирующего разряд. Показано сечение расчетной сетки, мгновенное распределение числа Маха и условная граница струи (30 % массовой доли CO_2, черная кривая).

средние значения критериев, рассчитанных по нескольким наборам данных.

Данные для анализа получены путем численного моделирования течения, формирующегося при поперечной инжекции трансзвуковой струи углекислого газа (CO_2) в сверхзвуковой поток воздуха в присутствии искровых разрядов на передней кромке инжектора. Постановка расчетной задачи обусловлена преемственностью по отношению к прошлым работам [13,14], которые были посвящены интенсификации перемешивания сверхзвукового потока с поперечной струей газа с помощью искровых разрядов, способствующих формированию возмущений в сдвиговом слое на границе струи.

Расчетная область изображена на рис. 1. Ввиду симметрии задачи моделировалось только полупространство $Z > 0$. Параметры сверхзвукового потока: число Маха $\mathrm{M} = 2$, статическое давление $P_{st} = 22$ kPa, статическая температура $T_{st} = 170$ K, скорость $U_\infty = 500$ m/s. Параметры струи: диаметр инжектора $D = 3$ mm, коэффициент динамического напора струи и потока $J = 1$, скорость в центре инжектора (в отсутствие разрядов) $U_{jet} = 270$ m/s. Разряды моделировались как импульсный нагрев в некоторой ограниченной области на кромке инжектора (рис. 1). В каждом разряде выделялась энергия $E = 25$ mJ за время $2\,\mu$s. Частота разрядов f задавалась в диапазоне от 8 до 50 kHz.

Численное моделирование было осуществлено в программном комплексе FlowVision методом URANS. В [13] была показана сеточная сходимость решения и проведена валидация метода на примере частного случая поперечной струи в сверхзвуковом потоке. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, проведенное в работе [14], свидетельствует о том, что выбранный метод расчета корректно определяет форму и частоту поперечных вихрей в сдвиговом слое на границе струи, а также корректно определяет характер течения в присутствии искровых разрядов. В настоящей работе использовалась сетка с динамической адаптацией к градиенту плотности и концентрации CO_2 (рис. 1). Шаг по времени составлял от 30 ns (во время разряда) до 100 ns (в промежутке между разрядами).

Четыре критерия эффективности перемешивания рассчитывались по полученным данным в плоскости $X/D = 5$, т.е. в плоскости, перпендикулярной свободному сверхзвуковому потоку и расположенной на $5D$ ниже по течению от центра инжектора. На рис. 1 отображены направления осей X, Y, Z. За нуль отсчета (начало координат) принят центр отверстия инжектора. Первый критерий — интегральный η_m (1). Ввиду того что смесь воздуха с CO_2 нереагирующая, значение W_{st} было произвольно задано равным 0.3. Второй критерий L — длина изолинии $W = 0.3$ в заданной плоскости. Третий критерий $c_{\max}$ — максимальная массовая концентрация CO_2 в этой же плоскости. Четвертый критерий S — площадь области, ограниченной изолинией $W = 0.3$, т.е. площадь сечения струи.

На рис. 2 приведены графики мгновенных значений η_m, L, $c_{\max}$. Критерий S не отображен, поскольку он ведет себя аналогично L. Для двух моментов времени (A и B) также приведены изображения, полученные путем интегрирования концентрации CO_2 вдоль направления оси Z (рис. 3). Ось Z ориентирована перпендикулярно плоскости рисунка (рис. 1). Ее нуль (начало координат) находится в центре отверстия инжектора.

Дополнительно отображено распределение W в плоскости $X/D = 5$ в случаях с разрядами на частотах $\mathrm{Sh} = 0.24$ и 0.3 — в те моменты времени, когда через данную плоскость проходит очередное крупное возмущение в сдвиговом слое на границе струи (поперечный вихрь). Здесь характеристическое время $\tau = D/U_\infty$ и

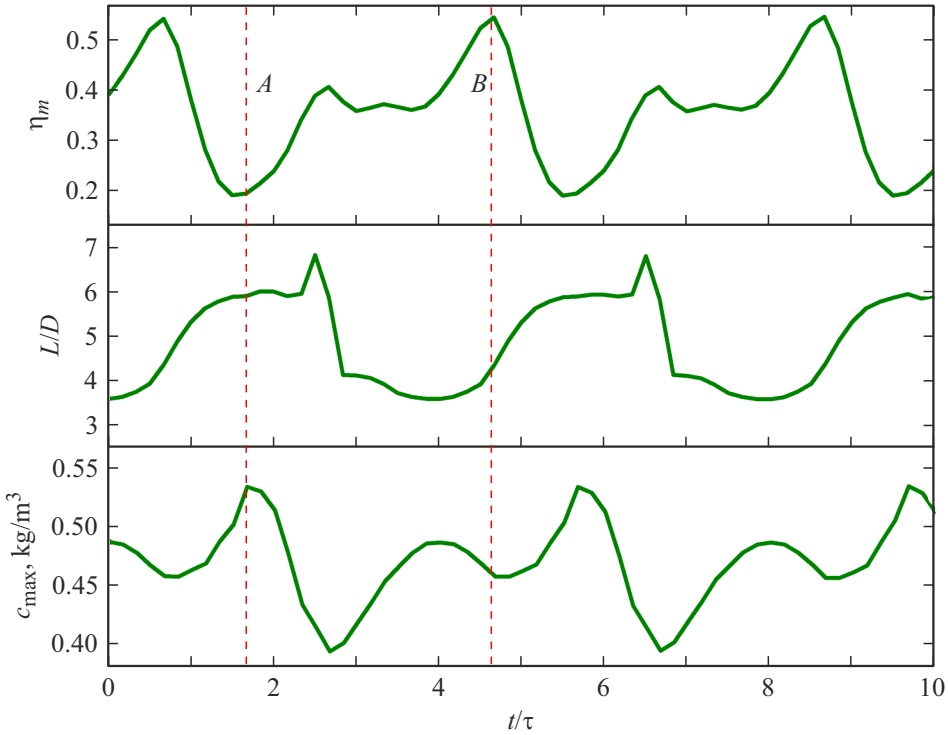

Рис. 2. Графики критериев перемешивания для случая отсутствия разрядов. Для этих данных коэффициент корреляции $c_{\max}$ и η_m равен -0.57, коэффициент корреляции L и η_m равен -0.49.

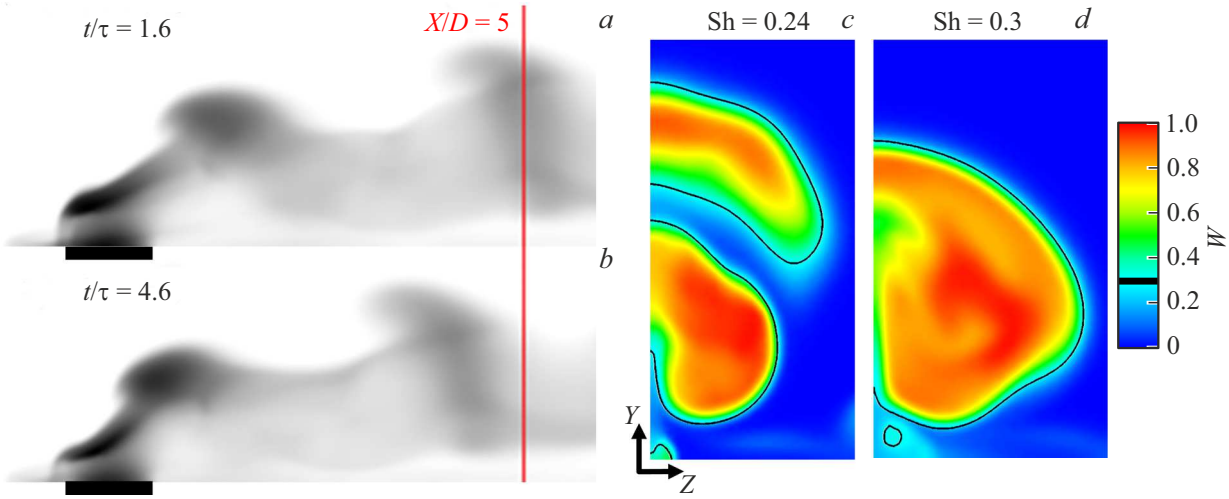

Рис. 3. Исследуемое течение. *a*, *b* — интеграл по Z от концентрации CO_2 для двух моментов времени (A и B на рис. 2); *c*, *d* — типичное распределение W в плоскости $X/D = 5$ для случаев с $\mathrm{Sh} = 0.24$ и 0.3 соответственно в момент прохождения поперечного вихря.

безразмерная частота $\mathrm{Sh} = fD/U_\infty$. Скорость свободного сверхзвукового потока $U_\infty = 500\,\mathrm{m/s}$.

Рассмотрим, как соотносятся критерии во времени. В момент времени A минимум η_m приходится на максимум $c_{\max}$. Это означает, что проходящая через сечение $X/D = 5$ порция смеси с высоким содержанием CO_2 приводит к ухудшению качества перемешивания. Действительно, рис. 3, *a* свидетельствует о том, что в этот момент времени через данное сечение проходит крупное возмущение (поперечный вихрь). В это же время критерий L выходит на плато, т. е., несмотря на прохождение в заданном сечении порции с повышенной концентрацией CO_2, условная граница струи остается приблизительно одной и той же протяженности. Сравнительно большое значение L в этот момент времени может быть объяснено тем, что в области поперечного

вихря изоповерхность W изгибается. В частности, это видно на рис. 1, где верхняя условная граница струи имеет S-образную форму и трижды пересекает вертикальную плоскость вида $X = \text{const}$.

В промежутке между моментами времени A и B критерий L испытывает резкое падение, сопровождающееся выходом η_m на плато и минимизацией $c_{\max}$. Уменьшение L связано с тем, что плоскость $X/D = 5$ перестает пересекать очередной поперечный вихрь. Этим же объясняется минимальное значение $c_{\max}$: вероятно, наибольшая концентрация CO_2 достигается в области поперечного вихря. А выход η_m на плато соответствует прохождению через плоскость $X/D = 5$ однородного участка струи между двумя поперечными вихрями.

В момент времени B критерий η_m достигает максимума. В это время критерий $c_{\max}$ не достигает ни максимума, ни минимума. Действительно, по смыслу критерия η_m эта ситуация означает, что струя и поток перемешаны наилучшим образом, т.е. распределение CO_2 в пространстве наиболее однородно. Критерий L в этот момент времени возрастает, что может быть обусловлено началом прохождения очередного поперечного вихря через плоскость $X/D = 5$. Это согласуется с рис. 3, b, который показывает, что к плоскости $X/D = 5$ приближается расширяющийся участок струи.

Итак, между мгновенными значениями различных критериев отсутствует сильная корреляция (рис. 2). Теперь рассмотрим их осредненные значения в плоскости $X/D = 5$ для нескольких наборов данных. На рис. 4 приведен график с осредненными значениями критериев для нескольких частот разрядов. Для удобства критерии приведены к безразмерному виду: для каждой частоты указано отношение осредненных критериев при данной частоте (η_m, L, $c_{\max}$, S) к их значениям при отсутствии разрядов ($\eta_{m,0}$, L_0, $c_{\max,0}$, S_0).

Все критерии указывают на то, что наилучшее перемешивание достигается при частотах разрядов, близких к $\text{Sh} = 0.24$. Эта „оптимальная“ частота близка к естественной частоте формирования поперечных вихрей в

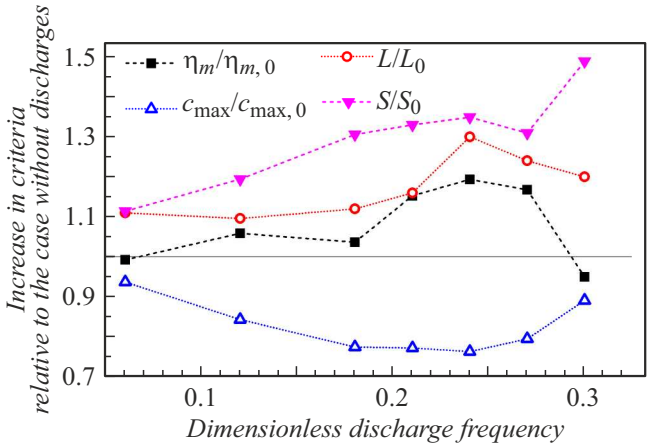

Рис. 4. Осредненные критерии перемешивания в зависимости от частоты разрядов.

сдвиговом слое с наветренной стороны струи $\text{Sh} = 0.24$ (или, если выразить безразмерную частоту через скорость в струе, $\text{Sh}_j = fD/U_j = 0.44$) [14]. Для критериев L и η_m максимум в диапазоне около $\text{Sh} = 0.24$ явно выраженный. Критерии $c_{\max}$ и S, наоборот, слабо различают случаи в диапазоне частоты разрядов от 0.18 до 0.27. При переходе от $\text{Sh} = 0.27$ к $\text{Sh} = 0.3$ критерий S резко возрастает, тогда как η_m, L и $c_{\max}$ показывают ухудшение перемешивания. А η_m становится даже меньше, чем в случае без разрядов (что, следует заметить, не находит отражения в поведении L и $c_{\max}$). Это объясняется существенно меньшим размером поперечного вихря по сравнению с другими случаями. Поэтому, когда очередной поперечный вихрь пересекает плоскость $X/D = 5$ (рис. 3, c, d), в случае $\text{Sh} = 0.3$ вместо двух больших областей с $W > 0.3$ остается только одна такая область: с большой площадью, но короткой границей.

Таким образом, было показано, что мгновенные значения критериев не коррелируют друг с другом во времени, поскольку по-разному реагируют на крупные возмущения на границе струи. Тем не менее при осреднении по времени η_m, L, $c_{\max}$ указывают на существование „оптимального“ диапазона частот разрядов, который соответствует наилучшему перемешиванию. Величину $c_{\max}$ можно диагностировать методом PLIF аналогично [12]. При этом требуется учитывать неоднородность лазерного излучения, однако этот критерий самый прямой и не требует дополнительных допущений и вычислений. S и L можно определять, например, путем визуализации струи с помощью засева, как в [9,10]. При этом требуется равномерность засева для корректного определения линий уровня концентрации, а вычисление L и S требует применения алгоритмов обработки изображений. Критерии S и $c_{\max}$ наименее избирательные. S способен выдавать значения, противоречащие η_m. Следовательно, при проведении экспериментов предпочтительно регистрировать длину границы струи L, поскольку этот критерий является наиболее избирательным.

Результаты данного исследования могут быть полезны при планировании и проведении экспериментов, направленных на изучение разных способов ускорения перемешивания газов в высокоскоростных потоках. Подробные данные о взаимосвязи нескольких критериев перемешивания позволят более обоснованно выбирать способы диагностики и анализировать экспериментальные данные. Помимо этого представленные результаты имеют ценность для изучения метода перемешивания газов с помощью искровых разрядов и физических механизмов, ответственных за интенсификацию перемешивания.

Финансирование работы

Работа поддержана госзаданием № 075-00269-25-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Sun, H. Wang, F. Xiao, in *Jet in supersonic crossflow* (Springer, Singapore, 2019), p. 27–199. DOI: 10.1007/978-981-13-6025-1

[2] Q. Liu, D. Baccarella, T. Lee, Prog. Aerosp. Sci., **119**, 100636 (2020). DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100636

[3] Н.Н. Федорова, М.А. Гольдфельд, Письма в ЖТФ, **47** (2), 3 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50536.18525 [N.N. Fedorova, M.A. Goldfeld, Tech. Phys. Lett., **47** (1), 50 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021010193].

[4] А.С. Акинин, Т.А. Коротаева, А.В. Старов, Письма в ЖТФ, **49** (17), 20 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.17.56082.19639 [A.S. Akinin, T.A. Korotaeva, A.V. Starov, Tech. Phys. Lett., **49** (9), 18 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.09.56701.19639].

[5] Y. Zhou, J. Wu, W. Huang, G. Choubey, Acta Astron., **214**, 389 (2024). DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.10.046

[6] J. Tan, D. Zhang, L. Lv, Acta Astron., **152**, 310 (2018). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.08.036

[7] M.C. Banica, T. Scheuermann, J. Chun, B. Weigand, J. Von Wolfersdorf, J. Propul. Power, **26**, 869 (2010). DOI: 10.2514/1.43599

[8] J. Watanabe, T. Kouchi, K. Takita, G. Masuya, AIAA J., **50**, 2765 (2012). DOI: 10.2514/1.J051550

[9] V. Sivadas, B. Pani, K. Bütefisch, G. Meier, Exp. Fluids, **23**, 105 (1997). DOI: 10.1007/s003480050091

[10] M. Sun, S. Zhang, Y. Zhao, Y. Zhao, J. Liang, Sci. Chin. Technol. Sci., **56**, 1989 (2013). DOI: 10.1007/s11431-013-5265-7

[11] M. Gruber, A. Nejad, T. Chen, J. Dutton, J. Propul. Power, **11** (2), 315 (1995). DOI: 10.2514/3.51427

[12] M. Mungal, S. Smith, in *Manipulation and control of jets in crossflow*, ed. by A. Karagozian, L. Cortelezzi, A. Soldati (Springer, Vienna, 2003), p. 15–24. DOI: 10.1007/978-3-7091-2792-6_2

[13] Л.С. Волков, А.А. Фирсов, Компьютерные исследования и моделирование, **15** (4), 845 (2023). DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-845-860

[14] Л.С. Волков, И.В. Селивонин, А.А. Фирсов, ТВТ, **63** (1), 24 (2025). DOI: 10.31857/S0040364425010045