

УДК 533.6.011.5

Влияние температуры газа на дальнобойность микроструй колебательно-неравновесного SF_6^*

И.С. Цырюльников, С.В. Кириловский, С. Г. Миронов,
Т.В. Поплавская

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

E-mail: tsivan@itam.nsc.ru, mironov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru

В статье показано, что дальнобойность равновесной микроструи SF_6 , нормированная на диаметр сопла, не зависит от размерной температуры торможения при сохранении четырех безразмерных параметров (нерасчетность, число Рейнольдса по диаметру сопла и два температурных фактора). В отличие от равновесного случая, дальнобойность колебательно возбужденной микроструи SF_6 существенно немонотонно зависит от размерной температуры торможения.

Ключевые слова: сверхзвуковые микроструи, колебательная неравновесность, численное моделирование.

Введение

Изучение влияния колебательной неравновесности молекул на газодинамику струй имеет фундаментальное значение при создании физических моделей потери устойчивости сдвиговых течений [1 – 3]. Задаче устойчивости струй равновесного газа посвящено большое число публикаций, обзор и анализ которых приведен в новейшей работе [4]. Тем не менее влияние колебательной неравновесности молекул на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) в слабо недорасширенных струях в настоящее время недостаточно изучен. В работе [5] было исследовано изменение режимов течения микроструй в зависимости от числа Рейнольдса Re_d , вычисленного по диаметру сопла d . Показано, что при $Re_d \gtrsim 1000$ характеристикой устойчивости микроструй является длина сверхзвукового участка струи (дальнобойность).

В равновесном случае достаточным набором параметров, определяющим дальнобойность в струйных течениях, являются такие безразмерные параметры, как нерасчетность n , число Рейнольдса Re_d , а также температурные факторы течения (отношения температуры торможения струи T_0 к температуре окружающей среды T_{inf} и T_0 к температуре поверхности сопла T_w). В представленной работе на примере слабо недорасширенного

*Работа выполнена в рамках госзадания Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

микроструйного течения SF_6 при фиксированных $\text{Re}_d = 1000$, $n = 1,363$, $T_0/T_{\text{inf}} = 1$, $T_0/T_w = 1$ выполнено расчетное исследование влияния температуры торможения потока на дальность колебательно неравновесной струи.

1. Постановка задачи

Авторами проведено прямое численное моделирование струйного течения SF_6 с учетом колебательной релаксации молекул на основе решения нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса. Расчетная область, так же как и в работе [3], состояла из соплового тракта с форкамерой и области истечения струи. Рассматривался как неравновесный, так и равновесный случай истечения SF_6 с разными температурами торможения из конвергентных сопел разного диаметра: $d = 13,4, 17, 22,22, 27,4, 33,33$ мкм при $T_0 = 300, 375, 450, 525, 600$ К соответственно, что обеспечивало $\text{Re}_d = 1000$. Величина Re_d соответствует характерному числу Рейнольдса $\text{Re}_L = \text{Re}_d/n^{0.5} \approx 857$ ламинарно-турбулентного перехода в недорасширенных струях [6]. Для моделирования неравновесности шести колебательных степеней свободы SF_6 использовалась двухтемпературная модель релаксационных течений, в которой изменение энергии каждой колебательной моды от времени задавалось уравнением Ландау – Теллера. Энергия колебательных степеней свободы рассчитывалась по характерным колебательным температурам, и ее изменение учитывалось в уравнениях Навье – Стокса. В равновесном случае процессы колебательной релаксации исключались, а теплоемкость при постоянном давлении c_p определялась как функция от температуры газа и характерных колебательных температур мод SF_6 . Более подробно постановка задачи была описана в работе [3]. В результате решения нестационарной задачи получены средние и пульсационные характеристики поля течения. Процедура их получения приведена в публикации [7].

2. Результаты численного моделирования

Численное моделирование равновесных и неравновесных струй SF_6 проводилось для разных размерных температур торможения при сохранении безразмерных температурных факторов течения. Это связано с тем, что при постоянном давлении торможения (n и Re_d фиксированы) с ростом температуры торможения увеличивается доля колебательной энергии газа по сравнению с энергией поступательно-вращательных степеней свободы, а также уменьшается время колебательной релаксации молекул газа. Это приводит к глобальному изменению газодинамики микроструйного течения [3] и его устойчивости [7].

На рис. 1а, 1б на примере мгновенных полей плотности видно, что наблюдается турбулизация течения как равновесной, так и неравновесной микроструи. Это свидетельствует о потере устойчивости микротечения и ЛТП. Причем протяженность ламинарного участка у неравновесной струи значительно больше, чем у равновесной. Турбулизация микроструи приводит к уменьшению осредненного числа Маха и расширению струи (см. также рис. 1с, 1д), что влияет на ее дальность. Дальность струи определяется как расстояние от среза сопла до точки на оси струи, где число Маха равно 1 (штриховая линия на рис. 1с, 1д). Таким образом, вследствие турбулизации микроструй их дальность может рассматриваться как характеристика, связанная с положением ЛТП.

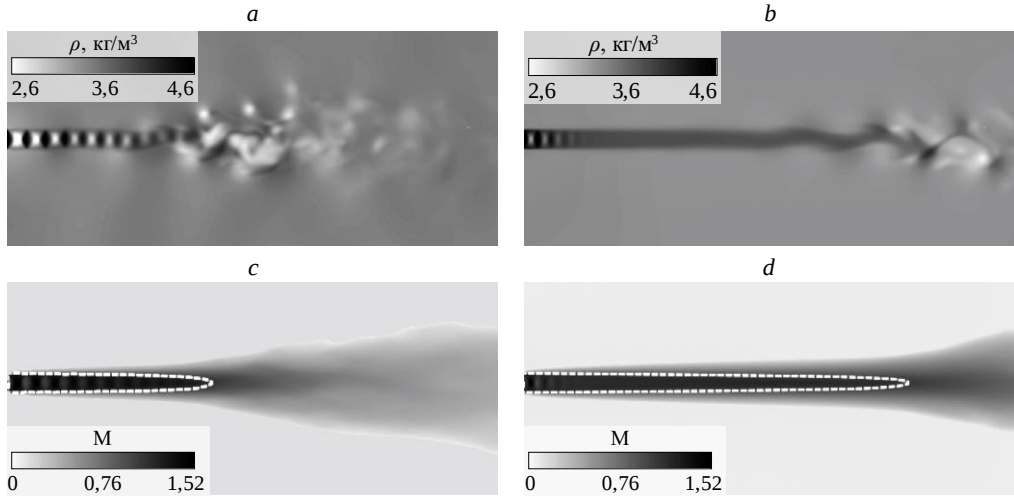


Рис. 1. Мгновенные поля плотности и осредненные поля числа Маха M равновесных (а, с) и неравновесных (b, d) сверхзвуковых струй SF_6 в плоскости симметрии при $n = 1,363$, $T_0 = 525$ К, истекающих из сопла диаметром $d = 27,4$ мкм. $Re_d = 1000$; пунктирная линия соответствует числу $M = 1$.

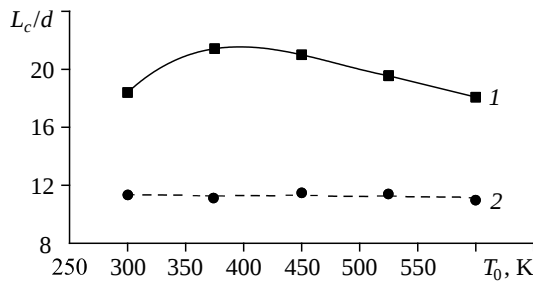


Рис. 2. Зависимость дальности микроструи SF_6 от температуры торможения. 1 — неравновесное течение, 2 — равновесное течение; $n = 1,363$, $Re_d = 1000$.

На рис. 2 показана дальность микроструи L_c , нормированная на диаметр сопла d , для равновесных и неравновесных микроструй SF_6 в зависимости от температуры торможения. Видно, что нормированная дальность равновесных микроструй практически не зависит от T_0 . Это подтверждает, что набор параметров n , Re_d , T_0/T_{inf} , T_0/T_w является достаточным для описания равновесного течения.

Дальность неравновесных микроструй оказалась почти вдвое больше, чем равновесных, и при этом продемонстрирована существенно немонотонная зависимость от температуры торможения. Механизм влияния колебательной неравновесности на волновые процессы в слое смешения микроструй требует дальнейшего изучения. Тем не менее размерную температуру торможения необходимо включить в число параметров, определяющих устойчивость и ЛТП микроструйных течений.

Заключение

В статье проведено численное исследование влияния размерной температуры торможения равновесного и неравновесного микроструйного течений SF_6 на его дальность при сохранении четырех безразмерных параметров течения ($Re_d = 1000$, $n = 1,363$, $T_0/T_{\text{inf}} = 1$, $T_0/T_w = 1$).

Показано, что дальнобойность неравновесной микроструи SF_6 , нормированная на диаметр сопла, существенно немонотонно зависит от размерной температуры торможения в отличие от равновесного случая, где дальнобойность практически постоянна для всех температур. Поэтому для неравновесных слабо недорасширенных микроструй SF_6 недостаточно набора параметров, определяющих дальнобойность и ЛТП в равновесных микроструях, и к ним следует добавить еще один параметр, а именно: размерную температуру торможения струи.

Список литературы

1. Молчанов А.М., Маслова Д.В. Расчет газодинамики и ИК-излучения 3D-струй с учетом колебательной неравновесности // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11, № 3. С. 106–116.
2. Григорьев Ю.Н., Горобчук А.Г., Ершов И.В. Модель пограничного слоя колебательно неравновесного диссоциирующего газа // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 5. С. 677–689.
3. Цырюльников И.С., Маслов Н.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Влияние степени нерасчетности сверхзвуковых осесимметричных струй многоатомного газа SF_6 на их газодинамическую структуру // Прикл. механика и технич. физика. 2024. Т. 65, № 1. С. 47–57.
4. Nogueira P.A.S., Jordan P., Jaunet V., Cavalieri A.V.G., Towne A., Edgington-Research D. Absolute instability in shock-containing jets // J. Fluid Mech. 2022. Vol. 930. P. A10-1–A10-29.
5. Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A., Tsyryulnikov I.S. Supersonic axisymmetric microjets: structure and laminar–turbulent transition // Microfluid Nanofluid. 2015. Vol. 19. P. 621–634.
6. Авдеевский В.С. Иванов А.В., Карпман И.М. и др. Влияние вязкости на течение на начальном участке сильно недорасширенной струи // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197, № 1. С. 46–49.
7. Tsyryulnikov I.S., Aniskin V.M., Mironov S.G. Stability of axisymmetric supersonic submerged microjet of nonequilibrium sulphur hexafluoride // J. Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1359. P. 012007-1–012007-6.

*Статья поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.,
после доработки — 30 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*