

03;10

Развитие неустойчивостей в газовых микроструях при акустическом воздействии

© М.С. Кривокорытов, В.В. Голуб, И.А. Моралев

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва
E-mail: mikhail.k@phystech.edu

Поступило в Редакцию 13 мая 2013 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния внешних акустических возмущений на устойчивость газовых струй миллиметрового и субмиллиметрового масштабов, истекающих в атмосферу. Получены данные визуализации течения теньевым методом, а также мгновенные поля скоростей течения методом PIV. Показано, что под действием звука в струе развивается асимметричная мода неустойчивости, нарастание которой вниз по потоку приводит к ее делению (бифуркации). Сравниваются частотные характеристики эффекта для струй различной геометрии, а также струй разных газов.

Исследованию устойчивости струйных течений посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Теоретически и экспериментально доказано, что свободное сдвиговое течение, имеющее точки перегиба в профиле скорости, невязко-неустойчиво. Его возмущения экспоненциально растут вниз по потоку, образуя вихри, которые объединяются друг с другом в форме больших когерентных структур. Однако при переходе к меньшим масштабам, механизм развития струй меняется. В работе [1] показано, что микроструи как с параболическим, так и с ударным профилем скорости сохраняют ламинарность на расстояниях порядка 10 калибров диаметра струи. При этом отсутствуют кольцевые вихри Кельвина–Гельмгольца, и развитие струи вниз по потоку определяется механизмом синусоидальной вихревой неустойчивости струи. В настоящее время в литературе имеется большое число работ по устойчивости дозвуковых макроструй, основные результаты которых приведены в [2], но только единичные исследования посвящены устойчивости возбужденных и невозбужденных газовых струй субмиллиметрового [3] и микронного масштабов [4].

Важность этих исследований очевидна как для науки, так и для множества технических приложений, таких как микроустройства пневмоники, микрореактивные двигатели, активное управление течениями, а также технологий MEMS. Помимо этого подобные исследования тесно связаны с задачами управления диффузионными пламенами, так, например, воздействуя на струю реагирующего газа в диффузионном метановом факеле, можно управлять концентрацией сажи и оксидов азота в продуктах горения [5].

Влияние акустики на струйные течения и пламена было отмечено более ста лет назад. К самым ранним описаниям таких эффектов можно отнести наблюдения Леконта [6], который заметил прыжки пламени горелки в ответ на определенные ноты виолончели. Следуя Тиндалю [7], „происхождение чувствительности следует, несомненно, искать в неустойчивости, сопровождающей вихревое движение“. Тиндаль показал, что чувствительным местом является основание пламени. „Звук, подводимый по трубке, не эффективен, если он подается к пламени несколько выше, а также, если он подходит к горелке ниже места, откуда выходит пламя. Такие же по существу явления получаются в случае, когда струя газа вытекает из отверстия под соответствующим давлением“.

Резюмируя все вышесказанное, стоит отметить, что исследованию влияния акустических колебаний на различные потоки и струи посвящена не одна работа, однако по-прежнему остается множество неясных вопросов, таких, например, как бифуркация струй. Данная работа посвящена исследованию бифуркации газовых струй под акустическим воздействием с использованием новейших методик диагностики потока. Приводятся результаты экспериментов, которые, возможно, помогут приблизиться к пониманию физической природы бифуркации струй.

Объектом исследования данной работы являлась струя газа (гелия или углекислого газа), истекающая в атмосферный воздух, и ее реакция на внешнее акустическое воздействие. Газ истекал в воздух из трубок с различными внутренними d (1 и 0.58 mm) и внешними D (1.6, 6 и 100 mm) диаметрами. Длина всех трубок более чем в сто раз превосходила их внутренний диаметр. Скорость истечения контролировалась вентилем точной регулировки расхода газа. Объемный расход газа измерялся ротаметром РМ-02-0.25 ГУЗ, по его значению вычислялась средняя по сечению скорость потока. Средняя скорость потока в эксперименте варьировалась таким образом, чтобы значение

числа Рейнольдса в трубках было меньше критического значения числа Рейнольдса для течения в трубе ($Re_c = 2300$). Это позволяет полагать, что в трубке формируется классическое Пуазейлевское течение, и профиль скорости на выходе из трубок параболический.

Источником акустических возмущений служила динамическая головка Senon Audio PT25Z, установленная на расстоянии 15 см от трубки так, что плоскость излучателя звука была параллельна оси трубки. Частота звуковых колебаний менялась в пределах от 100 до 9000 Hz, при этом звуковое давление на оси трубки определялось измерителем уровня шума AZ 8922 и поддерживалось на уровне 80 dB. На трубке (2 см от открытого конца) устанавливался микрофон, с его помощью можно было следить за профилем звуковой волны. В указанном диапазоне частот профиль звуковой волны имеет синусоидальную форму и фронт волны плоский. Значения числа Струхалия St_d (вычисленного по внутреннему диаметру трубок) в условиях эксперимента лежат в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-1}$.

Эксперименты с теневой визуализацией газовой струи проводились с помощью теневого прибора ИАБ-451 методом ножа и щели. В качестве регистрирующего устройства использовалась сверхвысокоскоростная камера Cordin 222-16, позволяющая получать серии из 16 кадров с временем экспозиции и задержки между кадрами от 5 ns и более. В качестве подсветки использовалась галогеновая лампа мощностью 60 W, из-за низкой мощности подсветки экспозиция составляла 10 μ s. Пространственное разрешение системы составляло 0.1 mm.

Измерение мгновенных полей скоростей потока проводилось методом Stereoscopic PIV на базе комплекса LaVision FlowMaster Stereo PIV, позволяющим измерять распределение мгновенных значений трех компонент вектора скорости потока в плоскости (плоскости лазерного ножа). Струя подсвечивалась лазерным ножом, сформированным из двойного лазерного импульса с энергией около 70 mJ и длительностью 6 ns каждый. Лазерный нож толщиной около 0.5 mm подсвечивал течение, засеянное частицами оксида титана (50μ m), в плоскости распространения струи, проходящей через ее центр. Окружающий воздух был засеян частицами табачного дыма по системе co-flow. Пространственное разрешение системы 0.2 mm. Измерения проводились с максимальной для системы скоростью съемки — 7 Hz, при этом количество измерений за один эксперимент определялось объемом памяти видеокамер и составляло значение 70. После усреднения по

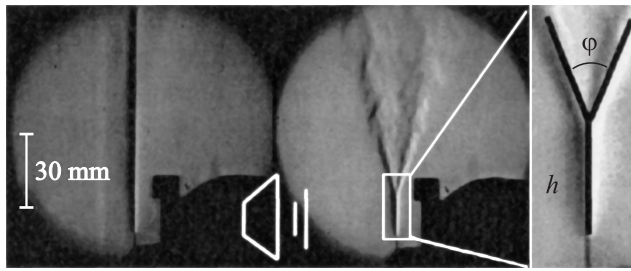


Рис. 1. Теплеровские фотографии струи гелия: слева — в отсутствии звука, справа — под действием звука 1700 Hz, 80 dB, $St_d = 3.5 \cdot 10^{-2}$.

70 измерениям получалось распределение вектора скорости в плоскости лазерного ножа.

На рис. 1 представлены теплеровские фотографии струи гелия, истекающего в окружающий воздух из трубки с $d = 1$ mm и $D = 1.6$ mm. Средняя скорость потока в трубке 65.5 m/s, что соответствует значению числа Рейнольдса $Re_d = 585$.

Как показал эксперимент, поведение газовой струи значительно зависит от внешнего акустического воздействия, при определенных условиях можно наблюдать деление (бифуркацию) потока (рис. 1). В работе измерялся угол бифуркации φ и расстояние от открытого конца трубки до места деления струи h . Было обнаружено, что зависимости φ и h от частоты имеют колоколообразную форму, причем для угла φ выпуклость вверх, а для расстояния h — выпуклость вниз. Более того, положение максимума зависимости угла бифуркации от частоты совпадает с минимумом зависимости расстояния до места деления струи от частоты.

На рис. 2, *a* представлена зависимость угла бифуркации от частоты внешнего акустического воздействия для различных скоростей струи гелия ($d = 1$ mm и $D = 1.6$ mm). Символы и кривые на рисунке соответствуют интерполяционным полиномам второй степени, вычисленным по измеренным значениям угла φ . Из рис. 2, *a* видно, что частота воздействия, при которой наблюдается эффект (частота бифуркации), зависит от средней скорости струи на выходе из трубки. Зависимость частоты бифуркации от средней скорости потока на выходе из трубки для струй различной геометрии и газов представлена на рис. 2, *b*.

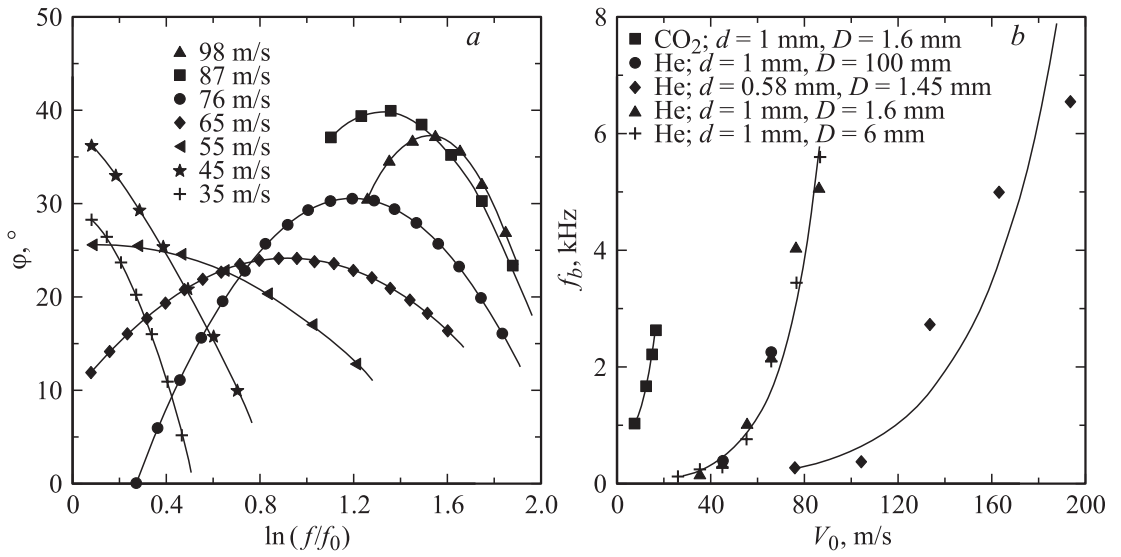


Рис. 2. *a* — зависимость угла бифуркации от частоты акустического воздействия при различных скоростях струи в логарифмическом масштабе, $f_0 = 100$ Hz; *b* — зависимости частоты бифуркации (f_b) от средней скорости потока на выходе из трубки (V_0) для струй различной геометрии и газов.

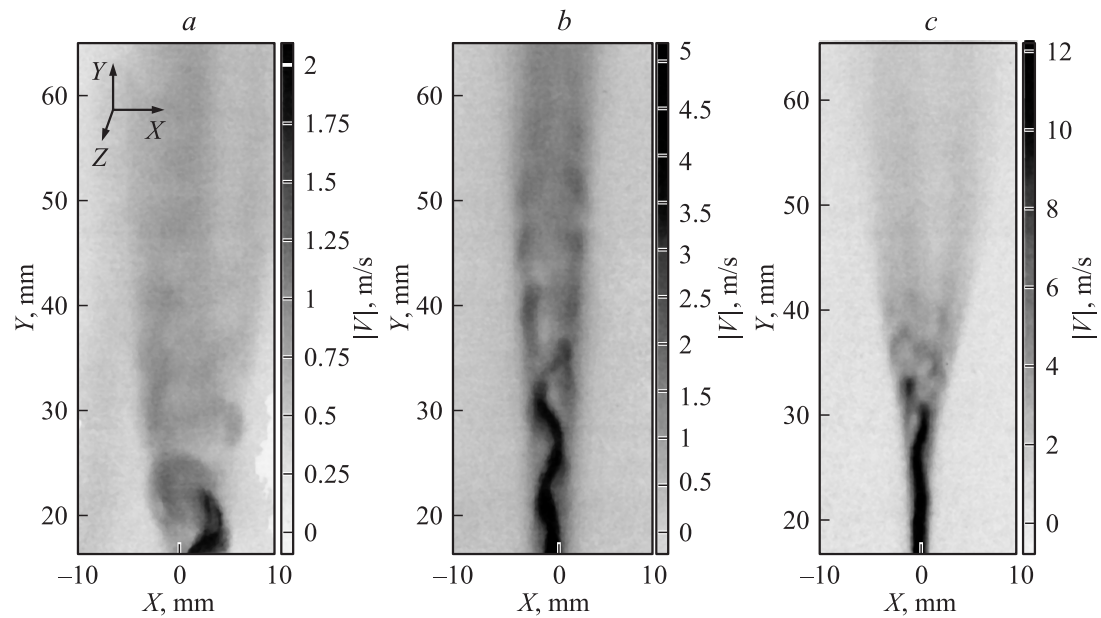


Рис. 3. Поля модуля скорости течения при различных экспериментальных условиях. Слева направо: $V_0 = 35 \text{ m/s}$, $f = 120 \text{ Hz}$; $V_0 = 45 \text{ m/s}$, $f = 300 \text{ Hz}$; $V_0 = 55 \text{ m/s}$, $f = 900 \text{ Hz}$.

На рис. 3 представлены поля модуля скорости течения в его продольном сечении для струи гелия ($d = 1 \text{ mm}$ и $D = 1.6 \text{ mm}$). На рисунке Y и X — пространственные координаты в правой прямоугольной системе координат, начало которой находится в центре струи на выходе из трубки. Направление распространения звука совпадает с направлением оси X .

Обнаружено, что эффект бифуркации потока обладает частотной зависимостью, т. е. наблюдается при определенной частоте воздействия. Частота, при которой наблюдается эффект, зависит от скорости потока, начального диаметра струи и газа, используемого в эксперименте. Увеличение скорости струи и ее диаметра приводит к резкому росту частоты, при которой наблюдается бифуркация. То же самое происходит при одновременном увеличении плотности газа и уменьшении его динамической вязкости.

При внешнем акустическом воздействии в струе развивается асимметричная мода неустойчивости, нарастание которой вниз по потоку приводит к дроблению струи на чередующиеся области, расходящиеся под определенным углом. На тепловых снимках, сделанных с большим временем экспозиции, это выглядит как раздвоение или бифуркация струи.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований президиума РАН „Горение и взрыв“, при поддержке совета по грантам президента Российской Федерации, грант № МК-2894.2012.8.

Список литературы

- [1] Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. // Вестник НГУ. Сер. Физ. 2010. Т. 5. В. 2. С. 28–42.
- [2] Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: ФМЛ, 2001.
- [3] Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. // Вестник НГУ. Сер. Физ. 2008. Т. 3. В. 3. С. 14–33.
- [4] Анискин В.М., Бунтин Д.А., Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 2. С. 17–23.
- [5] Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Володин В.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 10. С. 57–63.
- [6] Leconte // Phil. Mag. 1858. V. XV. С. 235.
- [7] Tyndall J. // Proceedings of the Royal Society of London. 1874–1875. V. 23. P. 159–165.