

Краткие сообщения

03

Особенности аэродинамических характеристик акустически модулированной струи газа

© Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов

Тамбовский государственный технический университет,
392000 Тамбов, Россия
e-mail: dmmordasov@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2016 г.)

На основе теоретического и экспериментального изучения аэродинамических характеристик акустически модулированных газовых струй установлено, что при докритическом режиме течения на угол раскрытия турбулентной струи на выходе струйно-акустического генератора оказывают влияние возникающие звуковые колебания. Доказано, что акустическое воздействие на ядро турбулентной струи приводит к возникновению гистерезиса в струйно-акустической системе. Дано теоретическое обоснование этого явления, экспериментально подтверждено влияние на ширину петли гистерезиса плотности отражающей поверхности.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44257.1910

Аэродинамическим характеристикам свободных турбулентных газовых струй, вытекающих из отверстия в диафрагме, посвящено большое количество работ. К таким характеристикам струи относятся: длина начального участка, поперечные размеры, скорость и др. [1]. До настоящего времени недостаточно изучено влияние акустических эффектов, возникающих при прохождении потока газа через отверстие в тонкой стенке, на аэродинамические характеристики турбулентных газовых струй ограниченной длины.

Авторами в настоящей работе приведены результаты исследований аэродинамических характеристик турбулентной свободной газовой струи, вытекающей из диафрагмы и ограниченной поверхностью нормально расположенной нагрузки.

Проведенные экспериментальные исследования течения газа на выходе из диафрагмы при числах Маха $M \ll 1$ ($0.01 \leq M \leq 0.05$) в диапазоне изменения расхода Q от $20.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ до $77.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ показали, что возможны два варианта течения: без генерации акустических колебаний и с генерацией. Эксперименты проводились с использованием диафрагмы со следующими конструктивными размерами (рис. 1): радиус отверстия $r = 1.25 \pm 0,01 \text{ mm}$, угол фаски $\alpha_{\text{chamfer}} = 65^{\circ} + 55'$, толщина диафрагмы $b = 2.50 \pm 0.05 \text{ mm}$.

В научно-технической литературе приводятся различные данные о форме и протяженности ядра постоянных скоростей в турбулентных струях. Разноречивыми являются сведения о численных значениях углов α , которыми определяются внешние границы акустически немодулированных струй. По некоторым источникам $\alpha = 14^{\circ}$, по другим $\alpha = 20^{\circ}$ или даже 25° [2–6].

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований влияния расхода газа на угол раскрытия

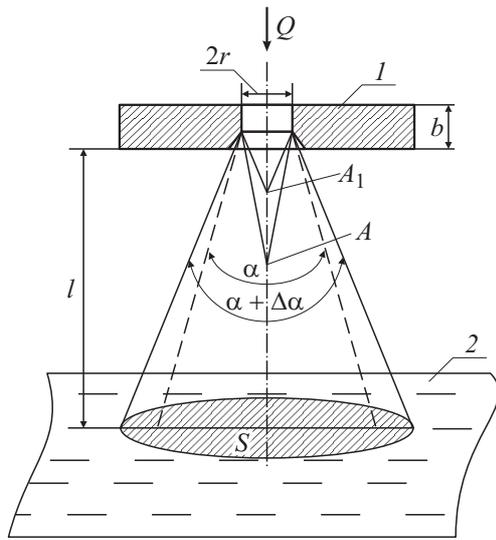
турбулентной струи и частоту самовозбуждающихся акустических колебаний.

При отсутствии генерации при различных расходах газа угол α изменялся от 15° до 18° . Такой разброс в экспериментальных результатах объясняется в первую очередь недостаточной четкостью границ струи. Как можно видеть, полученные результаты согласуются с результатами исследований турбулентных течений других авторов.

При подаче на вход диафрагмы I газа с расходом $65.2 \cdot 10^{-6} < Q < 77.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ образованная на ее выходе струя создает звуковое поле, что вызывает ее акустическую модуляцию. Под действием звукового давления происходит изменение аэродинамических характеристик струи [7]. Диафрагма выполняет функцию генератора струйно-акустических колебаний. Исследования такого устройства показали высокую стабильность

Таблица 1. Влияние расхода газа на угол раскрытия турбулентной струи и частоту акустических колебаний

$Q, 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	α, deg	f, Hz	$Q, 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	α, deg	f, Hz
20.8	15	–	67.8	20	2100
26.7	17	–	69.0	22	2110
32.5	18	–	70.3	23	2120
37.5	16	–	71.2	23	2142
42.5	18	–	72.5	23	2180
47.1	15	–	73.5	25	2256
51.7	16	–	74.1	25	2440
57.1	18	–	75.0	25	2626
61.0	15	–	76.7	26	2670
65.2	20	1950	77.4	25	2230



К взаимодействию акустически модулированной струи с нагрузкой.

генерируемых колебаний (отклонение частоты не более 0.2%) [8].

Эффекты, возникающие при акустической модуляции газовых струй, а также при их взаимодействии с различными поверхностями, находят применение при создании логических систем автоматического управления технологическими процессами [9], сенсоров промышленных роботов и манипуляторов [10], устройств контроля уровня [11,12], расхода [13], физических свойств веществ и материалов [14,15].

Возникающая дополнительная турбулизация струи под действием акустических колебаний приводит к уменьшению объема ядра постоянных скоростей струи. При этом точка A (рисунок) смещается в сторону генератора (точка A₁). Так как количество движения в струе газа остается постоянным, то пограничный слой увеличивается, что обуславливает увеличение угла α на $\Delta\alpha$, а в случае взаимодействия струи с преградой — увеличение площади S (рисунок).

При проведении экспериментальных исследований взаимодействия акустически модулированных газовых струй с различными отражающими поверхностями замечено, что при некотором расстоянии от источника струйно-акустического сигнала до поверхности происходит исчезновение колебаний звуковой частоты. Это связано с тем, что в пространстве между генератором и отражающей поверхностью, выполняющей функцию нагрузки [16], формируется отраженная волна, взаимодействие которой с падающей волной приводит к возникновению режима стоячих волн с характерным ему распределением узлов и пучностей. Причем, как показывают эксперименты, при приближении генератора к нагрузке расстояние до узла l меньше на Δl , чем расстояние l' для обратного хода. В системе наблюдает-

ся неоднозначность, которая может рассматриваться как струйно-акустический (аэродинамический) гистерезис.

При нормальном падении звуковой волны на поверхность раздела двух сред амплитуда акустического давления p на ней определяется по формуле [17]

$$p = \frac{2I}{c_r} \frac{(\rho_r c_r)^2 + (\rho_n c_n)^2 + \rho_r \rho_n c_r^2}{(\rho_r c_r + \rho_n c_n)^2}, \quad (1)$$

при этом интенсивность I акустической волны —

$$I = \frac{E}{\Delta S \Delta t}, \quad (2)$$

где c_r, c_n — скорости звука в воздухе с плотностью ρ_r и в нагрузке с плотностью ρ_n ; E — количество энергии, переносимой волной за единицу времени Δt сквозь единицу площади поверхности ΔS .

Формула (1) с учетом (2) примет вид

$$p = \frac{2E}{\Delta S \Delta t c_r} K,$$

где

$$K = \frac{(\rho_r c_r)^2 + (\rho_n c_n)^2 + \rho_r \rho_n c_r^2}{(\rho_r c_r + \rho_n c_n)^2}.$$

В режиме стоячих волн в каждой точке пространства энергия E акустической волны постоянна и одинакова. Звуковое давление на отражающей поверхности в момент образования узла стоячей акустической волны при приближении генератора к поверхности (прямой ход) определяется в виде

$$p = \frac{2E}{S_1 \Delta t c_r} K, \quad (3)$$

где $S_1 = \pi(r + l \operatorname{tg} \beta / 2)^2$ — площадь контакта струи с отражающей поверхностью при прямом ходе, r — радиус отверстия диафрагмы l (рисунок), $\beta = \alpha + \Delta\alpha$ — угол раскрытия турбулентной струи при соответствующей частоте генерируемых колебаний.

Аналогично для обратного хода

$$p = \frac{2E}{S_2 \Delta t c_r} K, \quad (4)$$

где $S_2 = \pi(r + l' \operatorname{tg} \alpha / 2)^2$ — площадь контакта струи с отражающей поверхностью при обратном ходе, $l' = l + \Delta l$, Δl — ширина петли гистерезиса, α — угол раскрытия турбулентной струи при отсутствии акустического воздействия.

Приравняв правые части выражений (3) и (4), получим $S_1 = S_2$ или $l \operatorname{tg} \beta / 2 = (l + \Delta l) \operatorname{tg} \alpha / 2$, откуда

$$\Delta l = \frac{l(\operatorname{tg} \beta / 2 - \operatorname{tg} \alpha / 2)}{\operatorname{tg} \alpha / 2}. \quad (5)$$

В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния плотности отражающей поверхности (жидкости) на ширину петли гистерезиса и

Таблица 2. Результаты экспериментального исследования влияния плотности жидкости на ширину петли гистерезиса в струйно-акустической системе

Вещество	ρ_l , kg/m ³	l , 10 ⁻³ m	l' , 10 ⁻³ m	Δl_e , 10 ⁻³ m	Δl_c , 10 ⁻³ m
Масло ТП-22	868	65.0	82.1	17.1	16.7
Масло М-8	883	64.3	80.5	16.2	16.5
Масло ТАП-15	923	63.6	79.7	16.1	16.3
Вода	998	61.9	78.0	16.1	15.9
Глицерин	1260	57.8	72.4	14.6	14.8

Примечание: Δl_e , Δl_c — экспериментальное и рассчитанное по формуле (5) значения ширины петли гистерезиса; ρ_l — плотность жидкости.

сравнение их с данными, полученными по формуле (5) при $\beta = 20^\circ$, $l \in [57.8; 65.0] \cdot 10^{-3}$ m.

Экспериментальная проверка показала, что отличие экспериментальных данных о ширине петли гистерезиса от вычисленных по формуле (5) не превышает 2.5%.

В результате проведенных исследований установлено, что при отсутствии генерации акустических колебаний газовой струей изменение расхода газа не приводит к значительным изменениям аэродинамических характеристик. Возникающие акустические колебания вызывают дополнительную турбулизацию струи, сопровождаемую изменением размеров ее начального основного участка и угла раскрытия.

Анализ физических основ гистерезиса в струйно-акустической системе и результатов проведенных исследований позволяют сделать вывод, что уменьшить неоднозначность между прямым и обратным ходом можно путем дополнительного аэродинамического или механического воздействия на основной участок струи, нарушающего его структуру, вследствие чего угол раскрытия до и после воздействия остается практически постоянным.

Полученные в работе результаты изучения влияния плотности отражающей поверхности на ширину петли гистерезиса могут быть использованы при разработке принципиально новых струйно-акустических неразрушающих бесконтактных методов измерения физико-механических свойств веществ в условиях потенциально-опасных производств.

Список литературы

- [1] Гиневский А.С., Власов В.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 240 с.
- [2] Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 508 с.
- [3] Бай Ши-и. Турбулентное течение жидкостей и газов / Пер. с англ. под ред. К.Д. Воскресенского. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 344 с.
- [4] Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
- [5] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.
- [6] Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 204 с.
- [7] Chambers F.W., Goldschmidt V.W. // AIAA Paper. 1981. N 57. P. 1–10.
- [8] Мордасов Д.М. // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 7. С. 283–293.
- [9] Пиминов А.С., Барышников В.М. АС. № 821777. МКИ F15C 1/16. Оpubл. 15.04.1981. Бюл. № 14.
- [10] Давиденко В.Ф., Епишин С.М. Патент РФ № 2032183. МПК G01S 1/72. Оpubл. 27.03.1995. Бюл. № 10.
- [11] Мордасов Д.М., Мордасов М.М., Булгаков Н.А. Патент РФ № 2188395. МПК. G01F 23/00. Оpubл. 27.08.2002. Бюл. № 24.
- [12] Мордасов Д.М., Мордасов М.М., Мищенко С.В. // Датчики и системы. 2002. № 1. С. 37–38.
- [13] Савицкий В.К. // Пневмоавтоматика. Тез. докл. XV всесоюзного совещания. Ч. 2. Львов. 1985. М.: Изд-во ИПУ, ??? С. 97–98.
- [14] Farmer T. Structural Studies of Liquids and Glasses Using Aerodynamic Levitation. Switzerland.: Springer, 2015. 113 p. DOI: 10.1007/978-3-319-06575-5_1.
- [15] Balabel J.A. // Emirates J. for Engineering Research. 2007. Vol. 12. N 3. P. 35–46.
- [16] Лапин А.Д. Акустические длинные линии и волноводы. М.: МИРЭА, 1979. 108 с.
- [17] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1974. С. 543.