



Резонансные колебания газа в закрытой трубе с параболическим распределением температуры по радиусу¹

Фадеев С.А., Шайдуллин Л.Р.

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань

Колебания газа в замкнутых объемах с неоднородным распределением температуры являются широко распространенным процессом в различных приложениях и технических устройствах. Самовозбуждение колебаний в теплофизических системах, представляющее собой периодические по времени изменения гидродинамических и термодинамических параметров, является основой вибрационного горения [1–4]. Эффективность термоакустических устройств (тепловые двигатели, холодильники) зависит от амплитудных характеристик колебаний давления и скорости газа [5–7], поэтому необходимо дальнейшее проведение исследований колебаний газа при наличии температурного градиента.

Колебания газа в закрытой трубе описываются линеаризованной системой уравнений Навье–Стокса и уравнением энергии для стационарного температурного поля. Газ в трубе нагревается во всем объеме за счет объемной плотности теплового

потока Q . Расчеты проводились в осесимметричной геометрии с параметрами трубы длиной L и радиусом R , указанными в [8] и амплитудой смещения поршня $l_0 = 0.01$ мм. На первом этапе решалось уравнение энергии с граничными условиями Дирихле на боковой стенке и Неймана на поршне и закрытом конце трубы для нахождения фоновой температуры в трубе. На втором этапе решаются уравнения Навье–Стокса с прилипающими и изотермическими граничными условиями на боковой стенке и закрытом конце трубы. На поршне задается граничное условие для осевой компоненты скорости ωl_0 , где ω — циклическая частота колебаний газа.

Показано, что наличие объемной плотности теплового потока в трубе приводит к интенсификации колебаний. При возбуждении колебаний газа в трубе с неоднородным распределением температуры по радиусу профиль стоячей волны зависит от профиля температуры [9]. В связи с искривлением фазовых плоскостей скорость продольных колебаний газа в ядре потока приобретает зависимость от радиальной координаты [10]. По этой причине в ядре потока наблюдается, близкий к параболическому, радиальный профиль безразмерной амплитуды колебаний осевой компоненты скорости газа,

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01169, <https://rscf.ru/project/23-79-01169/>

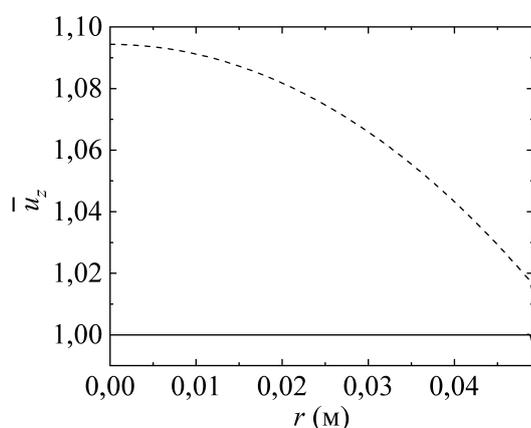


Рис. 1. Радиальное распределение безразмерной амплитуды колебаний осевой компоненты скорости газа в ядре потока (сечение $z = 0.5L$) при $Q = 0$ (сплошная линия) и $Q = 1$ кВт/м³ (штриховая линия)

как показано на рисунке 1, ($\bar{u}_z = u_z/u_0$, где u_0 — амплитуда колебаний скорости газа в ядре потока (сечение $z = 0.5L$) при $Q = 0$).

Для описания радиального распределения амплитуды колебаний скорости газа была подобрана аналитическая функция, что позволило провести анализ источника импульса, обусловленного вязкостью, в данном случае отвечающего за перенос импульса по радиусу [11]. Анализ показал, что наличие объемной плотности теплового потока в трубе со стенками, поддерживаемыми при постоянной температуре (температура стенок ниже средней температуры рассматриваемого объема) уменьшает абсолютное значение среднего, по сечению трубы, источника импульса, обусловленного вязкостью. Таким образом, увеличение амплитуды резонансных колебаний газа связано с уменьшением переноса импульса по радиусу и, соответственно, потерь, обусловленных вязкостью.

Заключение

Исследованы резонансные колебания газа в закрытой трубе с учетом объемной плотности теплового потока в рассматриваемом цилиндрическом объеме. При наличии объемной плотности теплового потока в трубе амплитуда колебаний осевой компоненты скорости газа приобретает, близкую к параболической, зависимость от радиальной координаты. Это ведет к увеличению амплитуды резонансных колебаний газа за счет уменьшения переноса импульса, обусловленного вязкостью.

Список литературы

- [1] Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. С. 500
- [2] Натанзон М.С. Неустойчивость горения. – М.: Машиностроение, 1986. С. 248
- [3] Мелких А.В., Селезнев В.Д. Автоколебания неизотермического течения вязкой жидкости в канале // ТВТ. 2008. Т. 46. № 1. С. 100 – 109.
- [4] Басок Б.И., Гоцуленко В.В. Автоколебания, возбуждаемые теплопроводом от потока нагретого газа // Труды МФТИ. 2018. Т. 10. № 4. С. 142 – 149.
- [5] Swift G.W. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. – New York: Springer, 2017. Pp.326
- [6] Biwa T., Sobata K., Otake S., Yazaki T. Observation of thermoacoustic shock waves in a resonance tube // J. of the Acoustical Society of America. 2014. V. 136(??). Pp. 965 – 968.
- [7] Alcock A.C., Tartibu L.K., Jen T.C. Experimental investigation of an adjustable standing wave thermoacoustic engine // Heat and Mass Transfer. 2019. V. 55. Pp. 877 – 890.
- [8] Gubaidullin D.A., Tkachenko L.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R. Resonance Oscillations of Gas in a Closed Tube in the Presence of a Heterogeneous Temperature Field // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022. V. 43. No 5. Pp. 1110 – 1115.
- [9] Завершинский И.П., Коган Е.Я. Структуры газового разряда в акустическом поле // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 3. С. 281 – 288.
- [10] Hatsagortsyan K.Z., Galechyan G.A. Acoustic discontraction of gas discharge // Laser Physics. 1994. V. 4. No 3. Pp. 502 – 506.
- [11] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. ГРФМЛ. 2000. С. 733.