

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУОТКРЫТЫХ ТРУБАХ

При работе с жидким гелием часто наблюдаются колебания давления, сопровождающиеся большими теплопритоками в зону низких температур. Основной причиной этого являются термоакустические колебания. Однако ряд наблюдаемых на практике фактов выходит за рамки этих представлений. К кругу этих явлений относятся разогрев изолированных полуоткрытых труб, каковыми являются всевозможные отводы для установки датчиков, а также закрытые дренажные, байпасные и другие магистрали. Это явление, по-видимому, аналогично эффекту разогрева глубоких полостей, обтекаемых потоком газа [1, 2]. При этом в устье полости образуется поверхность раздела, совершающая поддерживаемые энергией проходящего потока автоколебания со значительной амплитудой и частотой, зависящей от геометрических характеристик полости.

Из исследований, имеющих отношение к дальнейшему, укажем на работы [3–7]. В частности, в [5, 6] содержится обширная библиография и анализ основных зарубежных источников. Результаты экспериментальных работ [1, 2] указывают на волновой механизм нагрева: в полуоткрытой трубе под действием колебаний давления в устье образуются ударные волны, что сопровождается ростом энтропии, т. е. необратимым выделением тепла. Известные расчетные работы используют большое число допущений и ограничений как физического, так и формального характера. Основным ограничением является положение о малости амплитуд колебаний, в то же время экспериментально обнаруживаются колебания значительной амплитуды. Использование же численных методов высоких порядков (как, например, схема работы [7]) может привести к искажению результатов из-за появления присущих этим методам нефизических пульсаций в решениях.

Целью настоящей работы была разработка численной методики, основанной на решении полной задачи интегрирования системы нестационарных нелинейных уравнений Эйлера для идеального и совершенного газа. Получена специальная форма безразмерных уравнений, введено понятие асимметрии всплеска давления на закрытом конце трубы, что позволило, используя схему С. К. Годунова, даже на сетках с малым числом узлов получить физически объяснимое решение. Получены частотные характеристики полуоткрытой трубы в интервале чисел Струхала $0,05 \div 1,25$. Показано, что на частотах линейных резонансов возникают благоприятные условия для образования и усиления ударных волн, приводящих к разогреву газа.

1. Постановка и выбор метода решения. Рассматриваются одномерные нелинейные колебания идеального газа в полуоткрытой трубе под воздействием периодически меняющегося давления в ее устье. При выборе метода решения были учтены следующие обстоятельства. Так как структура решения разностных уравнений в окрестности ударной волны отличается от решения дифференциальных уравнений газовой динамики на конечную величину при любом сколь угодно малом шаге сетки, а приращение энтропии в ударной волне пропорционально третьей степени приращения давления, то конкретная величина нагрева газа, рассчитываемая по изменению энтропии, делается мало достоверной, по крайней мере без принятия специальных мер. С другой стороны, во многих приложениях, особенно в криогенной технике, нагрев полуоткрытых трубопроводов – нежелательное явление, влияние которого должно быть устранено или сведено к минимуму. Поэтому основной целью численного исследования представляется изучение причины явления – образования ударных волн. Следствие – рост температуры газа до определенной величины – носит второстепенный характер, а к получаемым результатам следует относиться как к качественным.

Для решения задачи о колебаниях газа в полуоткрытой трубе был выбран метод С. К. Годунова, который успешно применялся для решения задач различных типов, в том числе и с колебаниями параметров на границах [8].

Обезразмеривание уравнений Эйлера производилось отнесением параметров к соответствующим масштабам, характеризующим невозмущенное начальное состояние газа, а также пространственно – временные ограничения системы

$$u^{\circ} = \frac{u}{a_0}, \quad \rho^{\circ} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad p^{\circ} = \frac{p}{\rho_0 a_0^2}$$

$$s^{\circ} = \frac{s}{R}, \quad t^{\circ} = \frac{t}{1/f}, \quad x^{\circ} = \frac{x}{L}$$

Здесь u , ρ , p , s , t , x – соответственно размерные величины скорости, плотности, давления, удельной энтропии, времени и координаты, отсчитываемой от устья; a_0 ,

p_0 – начальная скорость звука и плотность; f – частота колебаний давления в устье; L – длина полуоткрытой трубы; R – индивидуальная газовая постоянная.

Опуская знак градуса над безразмерными величинами, запишем исходную систему уравнений и граничные условия:

$$\text{Sh} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u = 0 \quad (1.1)$$

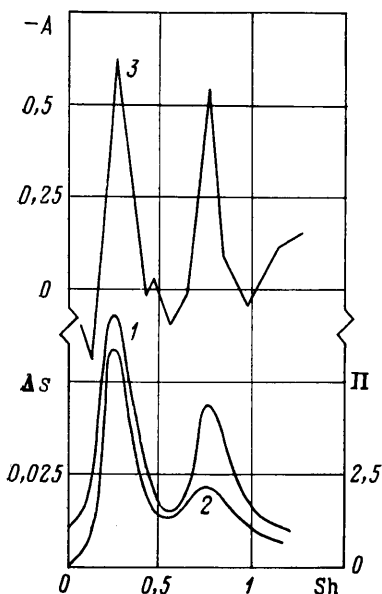
$$\text{Sh} \frac{\partial}{\partial t} \rho u + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho u^2) = 0$$

$$\text{Sh} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{k-1} + \frac{\rho u^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u p}{k-1} + \frac{\rho u^3}{2} + p u \right) = 0$$

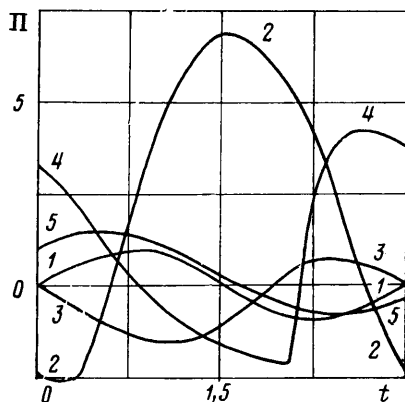
$$u(x=1) = 0; \quad p(x=0) = p_0 + p_a \sin 2\pi t \quad (1.2)$$

где $\text{Sh} = fL/a_0$ – число Струхаля, k – показатель адиабаты, p_0 – начальное давление газа в трубе, p_a – амплитуда колебаний давления.

Описание алгоритма численного решения рассматриваемой задачи можно найти в [9]. Алгоритм был программно реализован на языке Фортран для ЭВМ СМ-4.



Фиг. 1



Фиг. 2

Использовалась равномерная прямоугольная неподвижная сетка с шагами: по времени $\tau = \alpha h_x / \max(a + |u|)$, по пространству $h_x \leq 0,05/\text{Sh}$ [8].

Для числа Куранта α было принято значение 0,5. Основные результаты получены на сетке с числом узлов $N=21$. Отдельные моменты выяснялись на сетках с $N=101, 201$.

Для полной нормировки решения системы (1.1), (1.2) на параметры колебаний давления в устье вводился комплекс безразмерных величин $\Pi = (p - p_0)/p_a$, где p – текущее давление.

2. Результаты. На фиг. 1 приведены частотные характеристики полуоткрытой трубы. Кривая 1 – распределение средней величины положительного размаха колебаний давления у закрытого конца трубы, кривая 2 – распределение максимального приращения энтропии, а кривая 3 – распределение средней асимметрии A всплеска давления у закрытого конца трубы, которая определялась как среднее разностей симметричных во времени значений давления относительно максимальной его величины. Численные эксперименты показали, что таким образом введенная асимметрия хорошо выделяет режимы с ударными волнами по результатам расчетов на сетках с малым числом узлов. Дело в том, что при возникновении ударных волн фронт нарастания давления у закрытого конца трубы гораздо круче, чем фронт спада. Об этом свидетельствуют расчеты на мелких сетках, где «размазывание» ударных волн было незначительным.

Иллюстрацией эффективности такого рода представления может служить тот факт, что для получения приведенных на фиг. 1 частотных характеристик в диапазоне чисел Sh от 0,05 до 1,25 (всего 17 значений) понадобилось менее часа машинного времени, тогда как расчет одной точки характеристики на сетке с N равно 201 занимает такое же время.

Частотные характеристики однозначно показывают, что условия для образования ударных волн возникают при близости частоты колебаний давления в устье с собственными частотами линейных резонансов полуоткрытой трубы ($Sh=0,25 \cdot (2i+1)$, $i=0, 1, 2, \dots$), причем колебания только на первых собственных частотах имеют значительную амплитуду.

Полученные результаты полностью подтверждаются экспериментальными работами [1, 2], где максимальные колебания и разогрев газа наблюдались на частоте первого резонанса. При возбуждении второго резонанса интенсивность колебаний и величина нагрева уменьшались. В работе [3] колебания газа возбуждались втеканьем сверхзвуковой струи в полуоткрытую трубу. И в этом случае наблюдался разогрев газа на частотах линейных резонансов. Уместно отметить нереализуемость нелинейных резонансов в отличие от труб, где колебания возбуждались механически подвижным поршнем.

На фиг. 2 приведены распределения во времени давления у закрытого конца трубы в течение одного периода колебаний в устье для нескольких значений числа Струхала, а именно кривые 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям 0,25; 0,5; 0,75; 1. Кривая 1 — колебания давления в устье. Физические подробности явления видны отчетливо при просмотре графических «фильмов», рисующих распределение параметров вдоль трубы в последующие моменты времени. Волновая картина устанавливается по истечении нескольких периодов колебаний в устье. Лучшие условия для образования интенсивных колебаний реализуются при первом линейном резонансе. В этом случае при росте давления в устье в трубе формируется ударная волна, которая успевает дойти до закрытого конца и отразиться. И только после этого она встречается с волнами разрежения, генерируемыми падением давления в устье. При этом взаимодействии ударная волна исчезает, волны разрежения доходят до закрытого конца, отражаются и встречаются с волнами сжатия, идущими от устья на этапе роста давления в нем. Снова образуется интенсивная ударная волна, и процесс повторяется. Величина давления у стенки достигает значения $\sim 7p_a$.

При втором линейном резонансе волновая картина резко усложняется. Отражение ударной волны от закрытого конца происходит одновременно с приходом к последнему волн разрежения, причем в устье в это время генерируются волны сжатия. В результате рост давления у стенки ограничен величиной $\sim 4,5p_a$.

При колебаниях вдали от резонансов происходит «рассогласование» волнового взаимодействия, и ударные волны не формируются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Ю. Б., Черкез А. Я. Об эффекте повышения температуры торможения при обтекании газом глубоких полостей // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 3. С. 8–18.
2. Елисеев Ю. Б., Черкез А. Я. Экспериментальное исследование аномального аэродинамического нагрева тел с глубокой полостью // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 1. С. 113–119.
3. Купцов В. М., Остроухова С. И., Филиппов К. Н. Пульсации давления и нагрев газа при втекании сверхзвуковой струи в цилиндрическую полость // Изв. АН СССР. МЖГ. 1977. № 5. С. 104–111.
4. Грязнов В. П., Купцов В. М. Газодинамический нагрев в полостях под воздействием пульсаций давления на входе // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 6. С. 177–179.
5. Крайко А. Н., Ни А. Л. О приближении нелинейной акустики в задачах о колебаниях газа в трубах // ПММ. 1980. Т. 44. Вып. 1. С. 77–88.
6. Ни А. Л. Нелинейные резонансные колебания газа в трубе под воздействием периодически изменяющегося давления // ПММ. 1983. Т. 47. Вып. 4. С. 607–618.
7. Думнов Г. Е. Колебания газа в трубах под воздействием периодически меняющегося давления // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 5. С. 177–180.
8. Салганов Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред. М.: Наука, 1979. 286 с.
9. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

Москва
Донецк

Поступила в редакцию
10.V.1989