

УДК 534.2:532

ПРОДОЛЬНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ

Р. Г. Зарипов, Р. И. Давыдов, Н. В. Сонин

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, 420503 Казань

Приведены результаты экспериментальных исследований продольных нелинейных колебаний газа в закрытой трубе. Изучены волны давления при широких диапазонах частот и амплитуд возбуждения. Обнаружены сильные нелинейные колебания газа вблизи частоты, втрое меньшей первой собственной частоты газового столба.

В настоящей работе исследуются особенности нелинейных волн давления в установившемся режиме колебаний при широких диапазонах изменений частот и амплитуд возбуждения газа. Особое внимание уделено анализу обнаруженных нелинейных колебаний газа в окрестности частоты возбуждения, втрое меньшей первой собственной частоты (нелинейный резонанс при $\omega_{13} = \Omega/3$). Обзор экспериментальных и теоретических работ в этом направлении приведен в [1].

Продольные колебания столба газа в закрытой стеклянной трубе длиной $L = 870,5$ мм создавались плоским поршнем диаметром 39,3 мм. Гармоническое движение поршня осуществлялось электродинамическим стендом ВЭДС-400.

Частота и амплитуда колебаний поршня плавно регулировались и измерялись системой управления стенда. При этом частота возбуждения $\omega/(2\pi)$ изменялась от 60 до 210 Гц и дополнительно контролировалась частотомером ЧЗ-24. Давление измерялось пьезодатчиком, а показания снимались с помощью осциллографа С1-54. Система замеров давления газа использовалась ранее в экспериментах [2-4]. Резонансные частоты определялись по формуле $\omega_{nm} = n\Omega/m$ ($n, m = 1, 2, 3, \dots$), где $\omega_{11} = \Omega = \pi c_0/L$ — фундаментальная частота газового столба; c_0 — скорость звука в невозмущенном газе; L — длина трубы. При $m = 1$ имеем собственные частоты столба газа, которые определяют линейный резонанс. Значения $m > 1$ соответствуют частотам при нелинейных резонансах. При этом n — число, не кратное числу m .

Рассмотрим результаты, относящиеся к линейному резонансу вблизи первой собственной частоты $\omega_{11}/(2\pi) = 195,9$ Гц. На рис. 1 представлены осциллограммы резонансных колебаний давления газа во времени при возрастании амплитуды смещения поршня $l = 10^4 l/L$. При малой амплитуде возбуждения ($l = 3,67$) газ колеблется почти по гармоническому закону. Форма волны давления имеет симметричный и непрерывный вид. С увеличением амплитуды возбуждения происходит деформация формы волны. Появляются изломы в зонах разрежения и сжатия ($l = 5,51$). Передний фронт волны между этими зонами становится крутым ($l = 13,32$), и происходит увеличение амплитуды колебаний газа. В дальнейшем ($l = 22,28$) развивается сильнонелинейная волна, близкая к разрывной. Некоторые особенности волн давления отмечались в [5, 6], где рассчитывалась работа поршня за период колебания газового столба в резонансном режиме. При малой амплитуде возбуждения работа поршня расходуется на покрытие пристеночных и объемных потерь,

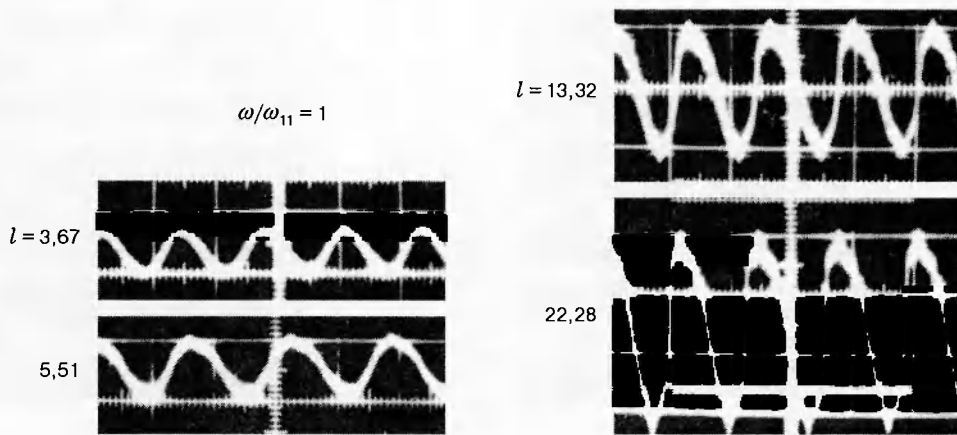


Рис. 1

обусловленных вязкостью и теплопроводностью газа. При больших амплитудах возбуждения газа работа поршня в основном расходуется на покрытие потерь при сжатии газа в нелинейных волнах. Здесь эффекты вязкости и теплопроводности лишь незначительно уменьшают амплитуду колебаний газа.

Перейдем к анализу колебаний газа в области нелинейных резонансов с $\omega \sim \omega_{12}$ и $\omega \sim \omega_{13}$. Описание экспериментальных работ при частоте $\omega \sim \omega_{13}$ в литературе отсутствует.

На рис. 2 представлены кадры с профилями волн, наблюдаемых в резонансах при возрастании амплитуды смещения поршня. Видно, что при малой амплитуде возбуждения газ колеблется почти по гармоническому закону. С увеличением амплитуды возбуждения начинает усиливаться нелинейность поведения газового столба. За период колебания поршня при $\omega = \omega_{12}$ возникает две нелинейные волны (рис. 2,а), а при $\omega = \omega_{13}$ наблюдается три волны (рис. 2,б). В первом случае волна дважды отражается от закрытого конца трубы, и после основной волны располагается промежуточная волна (отраженная от поршня) с малым спадом давления. Во втором случае отражение происходит трижды, и имеются основная и две промежуточных волны. Волнообразование при нелинейных резонансах является менее интенсивным по сравнению со случаем линейного резонанса. В линейном резонансе ($\omega = \omega_{11}$) волна один раз отражается от закрытого конца трубы, и поэтому наблюдается только основная волна (см. рис. 1). Максимальные значения безразмерного размаха колебаний давления $\Delta \bar{p} = 10^2 \Delta p / p_0$ составляют 0,520 и 0,299 при резонансных частотах $\omega_{12}/(2\pi) = 97,9$ Гц и $\omega_{13}/(2\pi) = 65,3$ Гц.

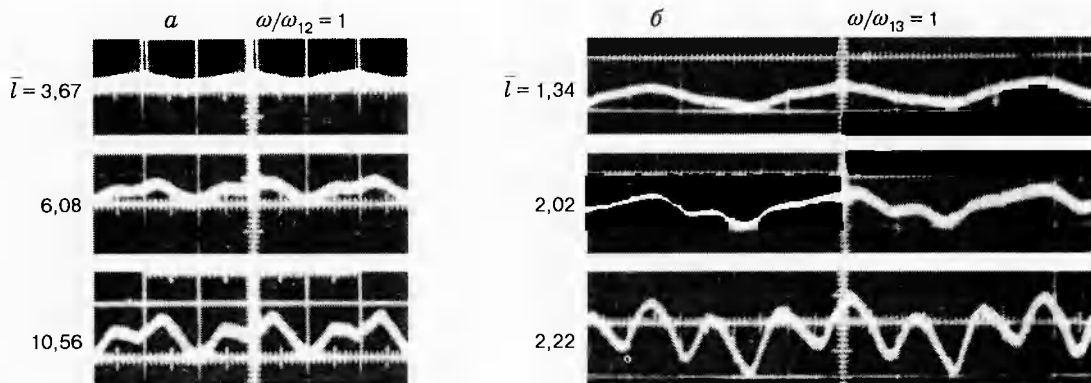


Рис. 2

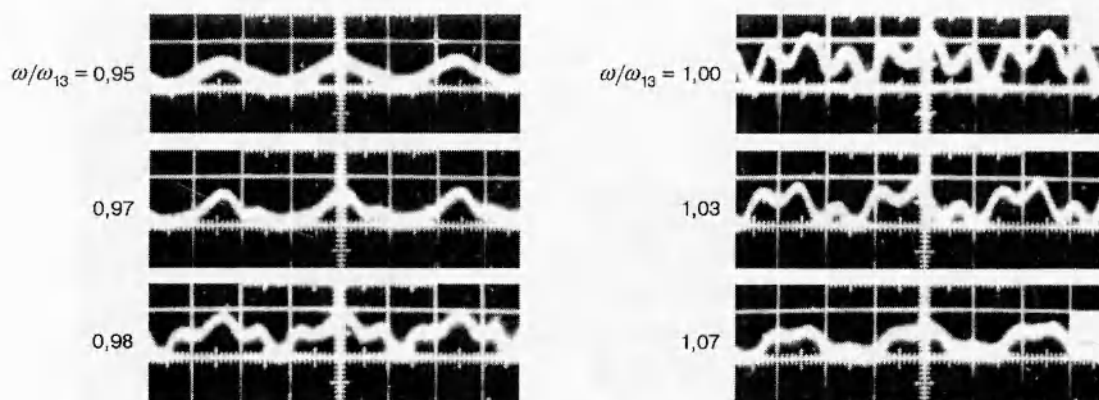


Рис. 3

На рис. 3 приведены осциллограммы колебаний давления газа при переходе по частоте ($\omega \sim \omega_{13}$) через нелинейный резонанс при $\bar{l} = 21,6$. В дорезонансном режиме ($\omega/\omega_{13} = 0,95$) колебания газа имеют форму, близкую к гармонической. При приближении к резонансу ($\omega/\omega_{13} = 0,97$) появляются изломы и формируется одна промежуточная волна. Затем ($\omega/\omega_{13} = 0,98$) наблюдается две промежуточных волны. В резонансе ($\omega/\omega_{13} = 1,00$) амплитуды основной и промежуточных волн возрастают до максимального значения. За резонансом амплитуды волн уменьшаются ($\omega/\omega_{13} = 1,03$) и колебания газа вновь приобретают форму, близкую к гармонической ($\omega/\omega_{13} = 1,07$).

Проведенные исследования показывают, что увеличение амплитуды возбуждения вблизи линейных и нелинейных резонансов приводит к развитию нелинейных эффектов и изменению формы колебаний газа в закрытой трубе. Обнаружены и выявлены особенности формирования нелинейных волн давления вблизи частоты, втрое меньшей первой собственной частоты газового столба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ilgamov M. A., Zaripov R. G., Galiullin R. R., Repin V. B. Non-linear oscillations of a gas in a tube // Appl. Mech. Rev. 1996. V. 49, N 3. P. 137-154.
2. Zaripov R. G., Ilgamov M. A. Non-linear gas oscillations in a pipe // J. Sound Vibration. 1976. V. 46, N 2. P. 245-257.
3. Зарипов Р. Г. Нелинейные колебания газа в открытой трубе // Акуст. журн. 1977. Т. 23, № 3. С. 378-383.
4. Зарипов Р. Г., Ильгамов М. А., Новиков Ю. Н., Репин В. Б. Нелинейные колебания газа в трубе // Тр. Всесоюз. конф. «Нелинейные явления», Москва, 12-14 сент. 1989 г. М.: Наука, 1991. С. 47-53.
5. Гуляев А. И., Кузнецов В. М. Колебания газа с большой амплитудой в закрытой трубе // Инж. журн. 1963. Т. 3, № 2. С. 236-244.
6. Temkin S. Non-linear gas oscillation in a resonant tube // Phys. Fluids. 1968. V. 11, N 5. P. 960-963.

Поступила в редакцию 30/VII 1998 г.