

УДК 533.6.011.72

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

М. А. Ибрагим, А. И. Климов, Ф. В. Шугаев

Описаны эксперименты по взаимодействию звуковых волн с ударной волной в ударной трубе при числах Маха ударной волны от 1,1 до 3. Звуковые волны создавались искровым генератором с регулируемым периодом следования и амплитудой. Исследовано движение возмущенной ударной волны.

Изучение взаимодействия акустических возмущений с ударной волной важно как с теоретической, так и с практической точек зрения. В частности, возникает возможность использования звуковых волн для нахождения основных термодинамических параметров (давления, плотности, энтропии и т.д.) за фронтом нестационарных ударных волн.

Задача о взаимодействии акустических возмущений с ударной волной рассматривалась в работах [1-4], где было показано, что наблюдается смещение частоты периодических звуковых волн и их усиление после прохождения фронта ударной волны. Эффект характеризуют коэффициентом усиления $k_1 = \delta p_2 / \delta p_1$, где δp_1 , δp_2 — амплитуды падающей и прошедшей звуковых волн.

Для нормального падения звуковой волны на фронте ударной волны $k_1 \propto M^2$, при $M \gg 1$, где M — число Маха ударной волны.

Кроме звуковых волн в потоке за ударной волной появляются энтропийные и вихревые возмущения. Иными словами, ударную волну можно рассматривать как «усилитель» и «генератор» малых возмущений газового потока.

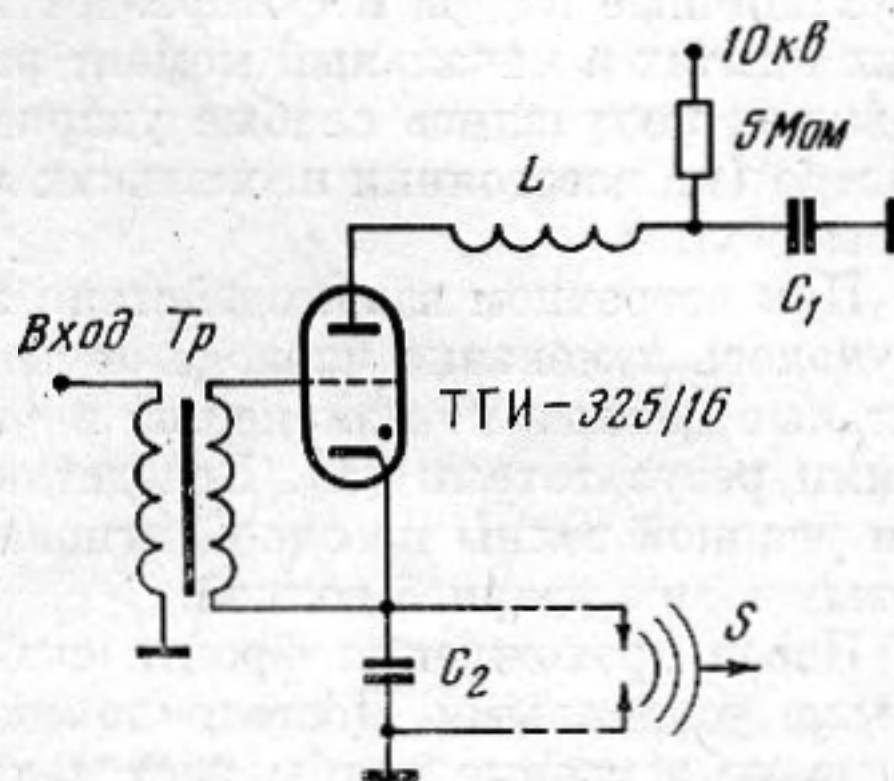
Для звуковых волн, догоняющих ударную волну, вводят коэффициент отражения: $k_2 = \delta p_{отр} / \delta p_1$, где $\delta p_{отр}$ — амплитуда отраженной звуковой волны. Оказывается, что $k_2 \leq 7\%$, $\gamma = 1,4$. В этом случае наблюдается эффект усиления ударной волны за счет относительно слабых звуковых волн.

В работах [4, 5] особое внимание уделялось устойчивости ударных волн. При этом устойчивость определялась как процесс затухания возмущения на плоском фронте ударной волны, вызванного падением сферической звуковой волны со стороны сжатого газа. Получен закон затухания

$$\delta z \cong t^{-1} \cos(\omega t + \varphi),$$

где t — время, ω — характеристическая частота процесса затухания, δz — амплитуда возмущения на фронте ударной волны.

Отметим, что экспериментальные работы по данному вопросу крайне немногочисленны.



Фиг. 1. Схема установки

В настоящей работе описаны результаты экспериментов по взаимодействию звуковых волн с ударной волной. Для проведения экспериментов был собран генератор (фиг. 1), позволяющий получать серию звуковых импульсов (до 10) с регулируемой амплитудой и периодом следования T (10^{-4} — 10^{-6} сек). Основными элементами схемы генератора являются емкости C_1 (1 мкф) и C_2 (0,1 мкф), индуктивность L (или сопротивление R), искровой промежуток. Устройство подобного рода известно как «схема с частичным разрядом емкости (C_1)».

Генератор запускался через блок задержки сигналом пьезодатчика, расположенного на ударной трубе. Через открытый тиратрон ТГИ-325/16 начинался разряд емкости C_1 и одновременный заряд C_2 . При напряжении самопробоя искрового промежутка происходил быстрый разряд емкости C_2 и схема работала повторно на подзарядку этой емкости. Таким образом осуществлялся многоимпульсный режим работы генератора.

Искровой промежуток монтировался в рабочей секции ударной трубы сечения 28×28 мм², все остальные элементы генератора были выполнены в отдельном экранированном корпусе. Соединительные провода выбирались короткими и неэкранированными, чтобы свести к минимуму паразитную индуктивность.

В зависимости от применяемых диафрагм в ударной трубе получались ударные волны с числом M от 1,08 до 3. Толкающим газом был азот или гелий. Рабочим газом служил воздух, давление которого в опытах изменялось от 0,01 до 0,1 атм.

Фотографирование производилось при помощи теневого прибора ИАБ-451, фоторегистраторов ЖФР и СФР-2М. Источником света служила лампа ИФП-2000 или искровой разрядник с длительностью вспышки 1 мксек. Фото пленки обрабатывались на измерительном микроскопе УИМ-1. Ошибки измерений не превышали 5%.

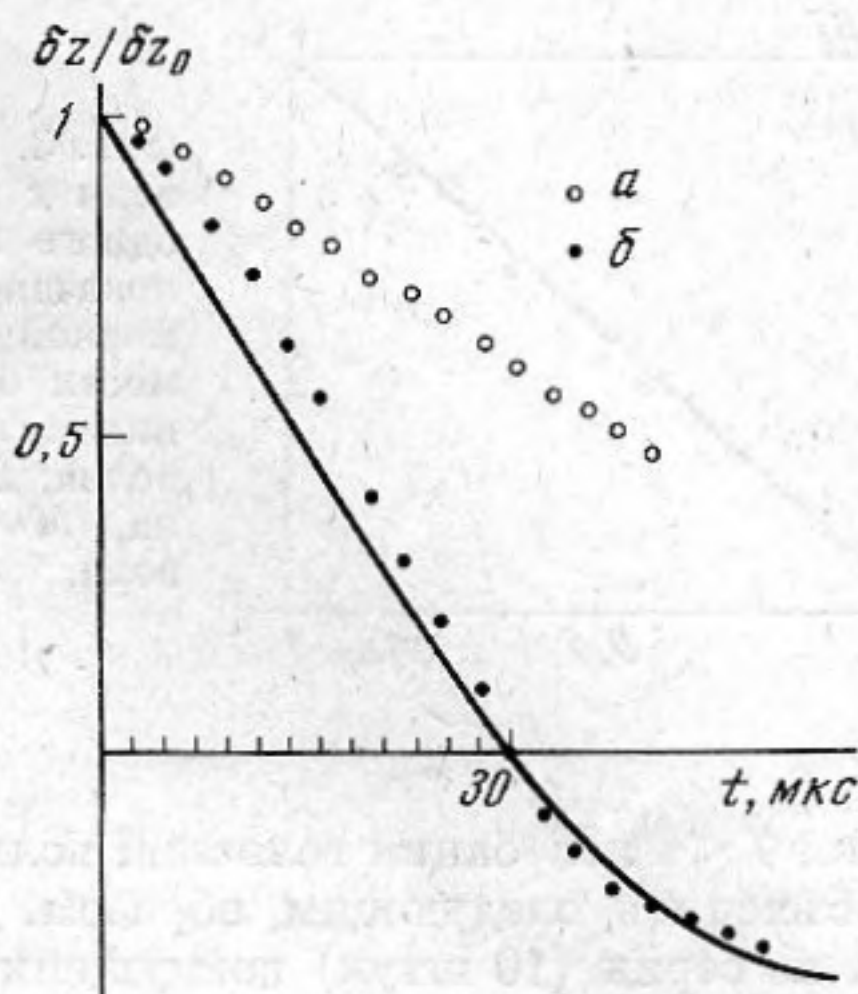
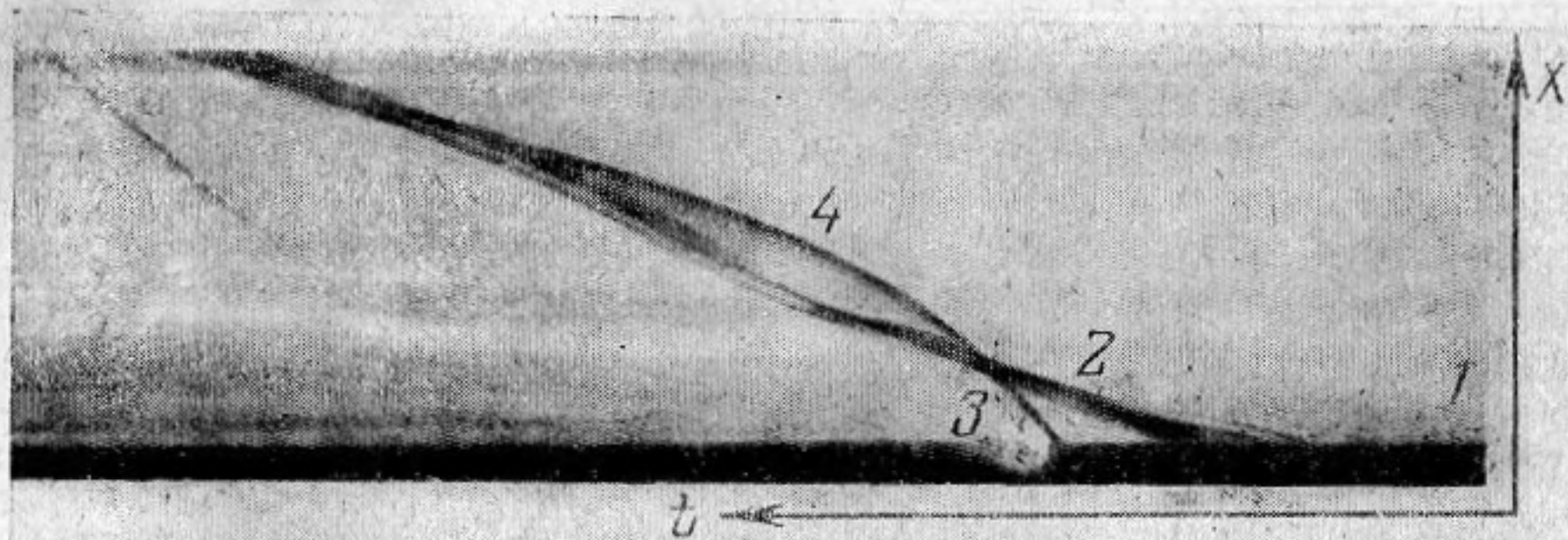
Типичные кадры и фоторазвертки представлены на фиг. 2 и 3. В наших опытах в начальный момент разряда емкости C_2 через искровой промежуток получались слабые ударные сферические волны, которые очень быстро (на расстоянии нескольких мм от разрядника) вырождались в звуковые волны.

При встречном взаимодействии звуковых волн с ударной волной нами изучалось изменение периода звуковых волн и их усиление. Экспериментальные данные по изменению периода хорошо согласуются с теоретическими результатами [1]. Вследствие этого возможно определение скорости ударной волны по одной мгновенной фотографии взаимодействия звуковых волн с ударной волной.

После прохождения фронта слабые звуковые волны оказались значительно усиленными. Достаточно сказать, что в некоторых опытах периодические звуковые волны настолько усиливаются, что становятся волнами конечной амплитуды, которые начинают догонять друг друга, в результате чего формируется слабая ударная волна. Из анализа опытных данных следует, что усиление звуковых волн сильно зависит от числа M ударной волны, причем эта зависимость соответствует теоретическим выводам работы [3].

Результаты экспериментов по взаимодействию звуковых волн с ударной волной одного направления показаны на фиг. 2.

После отражения подающей ударной волны 1 от корпуса разрядника (диаметром 6 мм) образовывалась головная ударная волна 2. В случае разрядника, выполненного в виде глухой стенки в ударной трубе, получалась плоская отраженная волна. Звуковые волны 3 догоняли отраженную волну и возмущали ее. Затем возмущение 4 затухало со временем t . Результаты по затуханию амплитуды возмущения $\delta z(t)$ на фронте ударной волны, вызванного падением сферической волны, для этих двух случаев представлены на фиг. 2. Там же сплошной линией показана теоретическая кривая $\delta z(t) \propto t^{-1} \cos(\omega t + \varphi)$. Частота ω подбиралась из сообра-



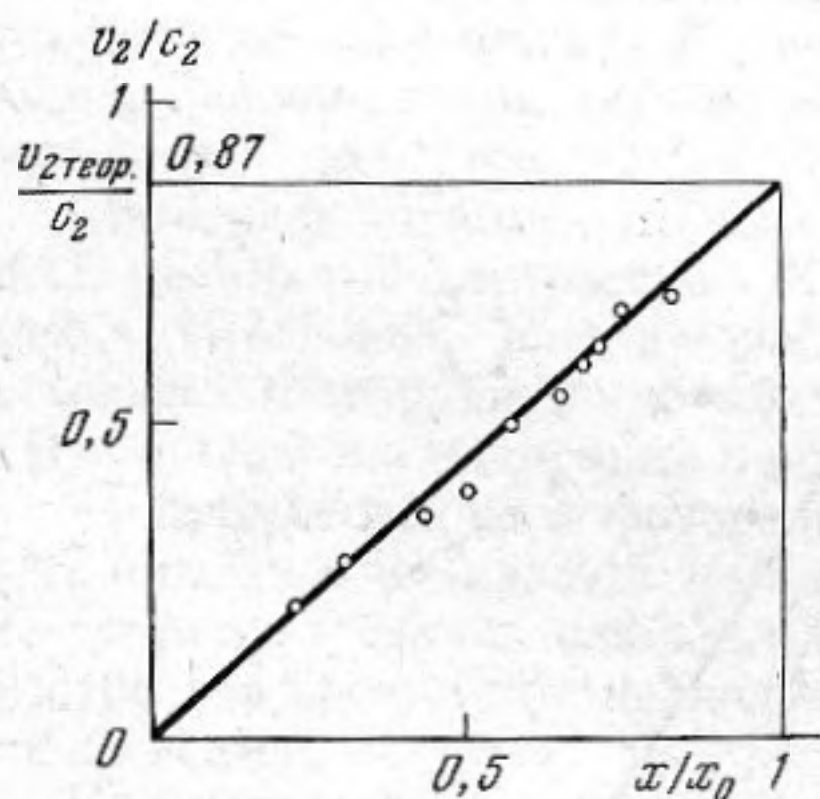
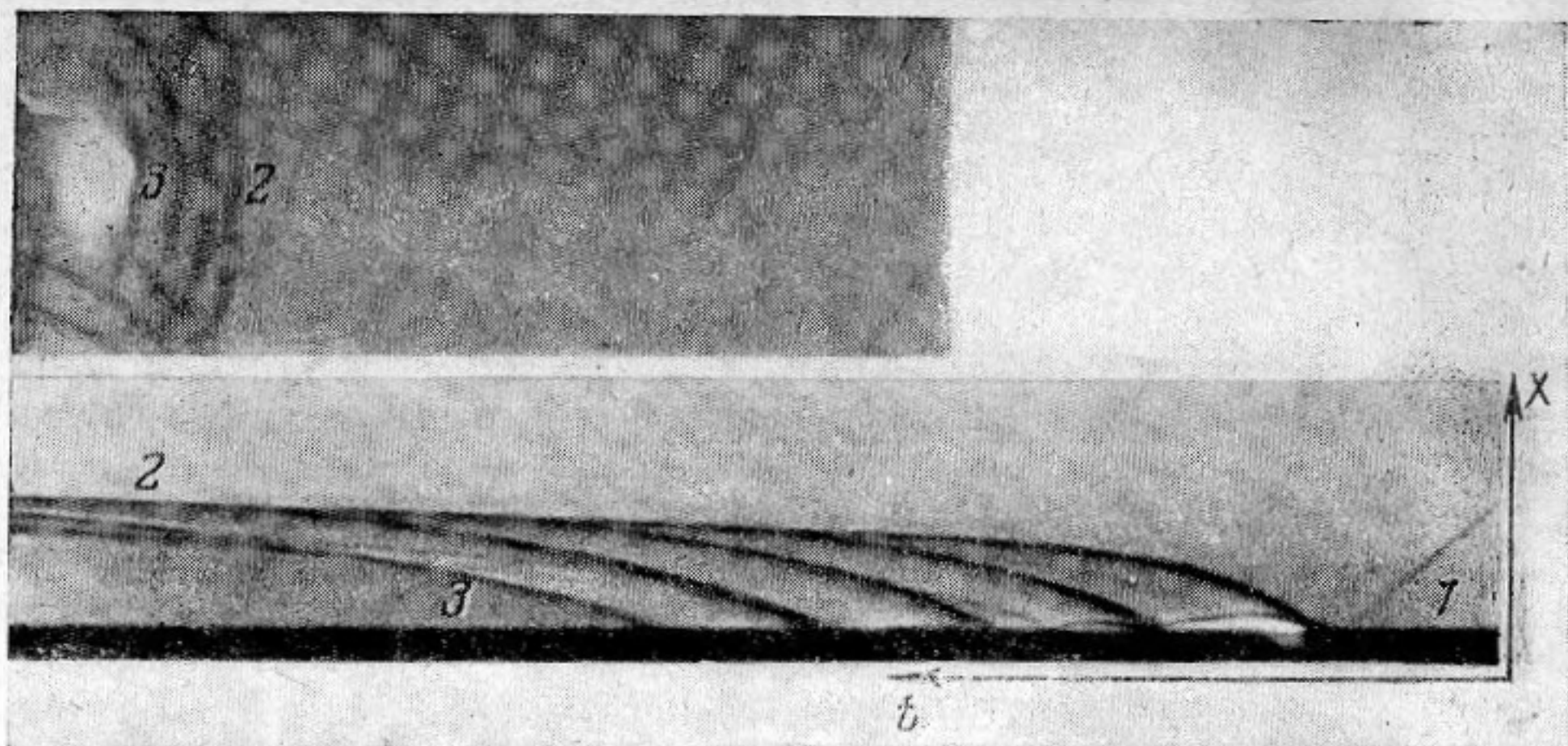
Фиг. 2. Затухание возмущения на фронте ударной волны, вызванного падением сферической звуковой волны: 1 — падающая ударная волна, 2 — отраженная ударная волна $M=1,2$; 3 — сферическая звуковая волна, 4 — возмущение на фронте плоской ударной волны; а — разрядник диаметром 6 мм; б — разрядник в виде глухой плоской стенки

жений [4] наилучшего совпадения с экспериментальными результатами.

Нетрудно заметить хорошее совпадение теоретических результатов с опытом в случае плоской отраженной волны. Однако в силу ограниченных размеров рабочей секции надежно проверить закон t^{-1} нам не удалось. На искривленной головной волне закон затухания возмущения заметно отличается от предыдущего случая.

Изучение затухания возмущений на фронте ударной волны позволяет объяснить обнаруженные нами два различных режима взаимодействия звуковых волн с головной ударной волной.

Введем эффективное время затухания τ , при котором амплитуда возмущения δz уменьшается в 3 раза. Для числа Маха головной ударной волны, равного 1,2, соответствующее значение $\tau \sim 10^{-4}$ сек (см. фиг. 2). Оказалось, что при периодах следования $T > \tau$ движение головной ударной волны носит колебательный характер, а при достаточно малых периодах



Фиг. 3. Взаимодействие звуковых волн с головной ударной волной одного направления. На графике показано распределение безразмерной скорости v_2/c_2 в зависимости от безразмерного расстояния x/x_0 ; 1 — падающая ударная волна; 2 — головная ударная волна, $M=1,2$; 3 — серия звуковых волн, x_0 — координата головной ударной волны

следования $T < \tau$ колебания головной волны практически отсутствуют. Это можно объяснить следующим образом. К моменту прихода очередного импульса из серии (10 штук) возмущение на фронте головной волны, вызванное предыдущим импульсом, не успевает затухнуть. В результате этого происходит усиление возмущения и среднее расстояние отхода головной волны от разрядника увеличивается. Этот режим взаимодействия зависит и от амплитуды падающих звуковых волн; для более сильных звуковых волн граничное значение периода следования T смещается в область меньших значений. Отметим, что аналогичное явление описано в [6].

На фиг. 3 видно, как изменяется период следования и скорость распространения звуковых волн относительно лабораторной системы отсчета в зависимости от расстояния до разрядника. Так как изменение скорости звука вдоль оси течения в области между головной ударной волной и разрядником не превышает 8%, ($M=1,2$), то легко найти распределение скорости потока $v(x)$ вдоль этого направления по изменению скорости распространения звуковых волн (или по формуле доплеровского смещения частоты).

На фиг. 3 представлено типичное распределение скорости $v(x)$ вдоль оси разрядника. Как видно, это распределение близко к линейному, что согласуется с имеющимися расчетами [7].

Хотелось бы отметить, что во всех наших опытах по взаимодействию звуковых волн с ударной волной не было замечено отраженных звуковых волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конторович В. М.* Отражение и преломление звука на ударной волне. ЖЭТФ, 1957, 33, 6(12), 1527-1528.
2. *Блохинцев Д. И.* Движущийся приемник звука. Докл. АН СССР, 1945, 47, 1, 22-25.
3. *McKenzie J. F., Westphal K. O.* Interaction of linear waves with oblique shock waves. Phys. Fluid, 1968, 11, 11, 2350-2362.
4. *Larworth K. C.* An experimental investigation of the stability of plane shock waves. J. Fluid Mech., 1959, 6, pt. 3, 469-474.
5. *Van Moorhem W. K., George A. R.* On stability of plane shocks. J. Fluid Mech., 1975, 68, pt. 1, 97-103.
6. *Глазнев В. Н.* Экспериментальное исследование отражения акустической волны от ударной. Изв. СО АН СССР. Сер. техн. н., 1974, № 3, вып. 1, 61-66.
7. *Любимов А. Н., Русанов В. В.* Течение газа около тупых тел. М., «Наука», 1970.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
Физический факультет

Поступила
2 сентября 1977 г.