

П. Н. КУБАНСКИЙ

**ТЕЧЕНИЯ У НАГРЕТОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА
В СТОЯЧЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ**

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 6 XII 1951)

1. Введение. Правильные течения воздуха у стенок твердых тел, вызываемые акустическими колебаниями, давно известны и носят название акустического ветра (¹⁻⁴, ⁷). Наблюдаемые течения связаны с вязкостью, действие которой проявляется особенно сильно вблизи стенок твердого тела. Однако даже в вязкой жидкости эти течения могут возникать только при достаточно мощных колебаниях, так как вызываются нелинейностью колебаний и определяются членами второго порядка в уравнениях нелинейной акустики. Интенсивные и своеобразные течения можно вызвать у стенок твердого тела, поместив его в достаточно мощную стоячую акустическую волну. Если твердое тело нагрето, то картина течений делается обозримой при наличии простейших оптических средств.

Как известно из акустики, при колебаниях конечной амплитуды возможно образование стоячих волн двух типов, а именно:

1) Вынужденных стоячих волн, возникающих в том случае, если частота внешних колебаний не совпадает с собственной частотой колебаний системы излучатель — отражающая стенка.

2) Стоячих волн, которые устанавливаются при совпадении частоты внешних колебаний с собственной частотой колебаний системы излучатель — отражающая стенка.

Во втором случае возникает резонанс между вышеуказанными частотами. В стоячих волнах второго типа появляются высшие гармоники. Форма волн искажается (⁵).

Ниже приводятся результаты проведенных нами экспериментов в стоячих волнах обоих типов.

2. Методика эксперимента. Акустическое поле создавалось вибратором Гартмана, излучения которого собирались в параллельный пучок с помощью параболического рефлектора. В результате преобразования излучаемой вибратором волны в плоскую интенсивность по фронту волны была распределена неравномерно.

Для задержания потоков воздуха, исходящих от вибратора, перед рефлектором была установлена перегородка из бумаги толщиной 30 μ . На расстоянии 40 см от бумажной перегородки для образования стоячей волны располагалась отражающая стенка. Перемещая отражающую стенку параллельно самой себе, можно было изменять расстояние от нее до вибратора и таким образом влиять на собственную частоту системы вибратор — отражающая стенка.

В акустическое поле помещалась гладкая латунная калориметрическая трубка диаметром 2,4 см и длиной 32,5 см, снабженная электриче-

ским нагревателем. Внутри трубки была смонтирована термопара для измерения температуры стенки. Потребляемая нагревателем мощность измерялась с помощью ваттметра, что давало возможность вычислить тепловой поток и затем коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к окружающей среде в условиях естественной конвекции. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Интенсивность в акустическом поле измерялась с помощью радиометра, а длина волны — трубкой Кундта. Для рассматривания на экране и фотографирования наблюдавшихся оптических картин в окрестности стенки калориметрической трубки была использована схема Дворжака.

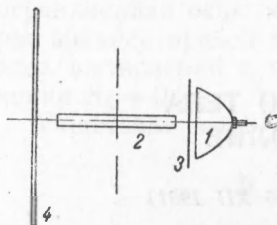


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — вибратор, 2 — калориметрическая трубка, 3 — бумажная перегородка, 4 — отражающая стенка

3. Явления в вынужденных стоячих волнах. При отсутствии в акустическом поле калориметрической трубки на экране не удавалось подметить каких-либо теней — экран оставался ровно освещенным. Интенсивность излучаемых колебаний в центре пучка изменялась в пределах от 0,03 до 0,16 вт/см², в частоте от 8 до 30 кгц.

При внесении в акустическое поле нагретой калориметрической трубки возникала картина, фотография которой приведена на рис. 2 (см. вклейку). При фотографировании температура стенки трубки достигала 70°, и интенсивность акустического поля, в которое была внесена трубка, составляла величину 0,08 вт/см² в центральной части пучка при длине волны $\lambda = 2,5$ см. Температура окружающей среды была около 15°. На фотографии у поверхности трубки видны весьма характерные по своим очертаниям темные полосы, отстоящие друг от друга на расстоянии, отвечающем половине длины волны излучаемых колебаний. В нижней части трубки полосы значительно короче, нежели сверху, вследствие искажающего действия естественной конвекции.

Измерение температуры воздуха, произведенное вблизи стенки термопарой, показало, что в области темных полос температура воздуха значительно выше, нежели в светлых участках между ними. На расстоянии 3 мм от стенки трубки разница в температурах составляла величину порядка 12°. Темные полосы расположены в узлах стоячей волны (в которых колебательная скорость равна нулю).

Оптическую неоднородность в среде, вызывающую появление на экране темных полос, создают участки среды, имеющие меньшую плотность. В этих участках, с одной стороны, происходит сжатие среды волной в узлах, что повышает плотность; с другой стороны, вследствие более высоких температур плотность в них уменьшается. Наблюдаемая оптическая картина показывает, что второй фактор оказывает на плотность преобладающее влияние.

Рассматривая очертания темных полос, можно видеть, что у самой поверхности трубки темные полосы расширяются, образуя как бы ножку, что особенно хорошо видно на нижнем участке трубки. На некотором удалении от поверхности трубки полосы также начинают расширяться и затем рассеиваются.

На основании изложенного можно высказать следующее предположение о характере наблюдаемых явлений. Вблизи стенки, тем более нагретой, силы вязкости велики, вследствие чего слой, прилегающий к стенке трубки, по своим физическим свойствам отличается от остальной среды. Если на внешней границе этого слоя возникает течение, направленное от узлов к пучностям, то вблизи стенки течение обратного направления: от пучностей к узлам. Вследствие взаимодействия двух соседних течений в узлах, непосредственно у стенки, произойдет встреча двух взаимо-

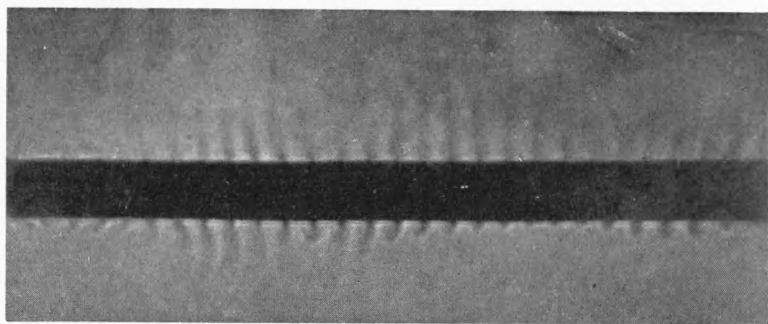


Рис. 2

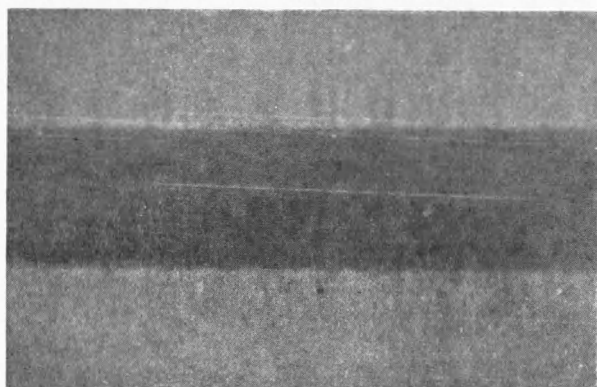


Рис. 3

противоположных течений. Наоборот, на внешней границе рассматриваемого слоя течения будут расходиться в разные стороны.

В результате изложенного в узлах и возникают, в нормальном направлении по отношению к стенке, течения, зафиксированные на фотографии. Вероятно, эти течения имеют форму концентрических по отношению к калориметрической трубке колец. Естественная конвекция искажает правильную форму этих колец.

4. Явления в стоячих волнах. Применяя оптический метод исследования, по характеру возникающих течений можно обнаружить присутствие высших гармоник в стоячей акустической волне, а также получить некоторые данные о характере деформации волны. Если достигнут резонанс, число видимых на экране полос увеличивается. Основные полосы делаются тоньше и как бы раздвигаются. Рядом с ними возникают еще две полосы, которые заметны несколько слабее, нежели первые две. Таким образом, число полос делается вчетверо больше, т. е. на каждую полуволну будет приходиться три дополнительные полосы (см. рис. 3 на вклейке).

Возникновение трех дополнительных полос на протяжении длины полуволны может быть объяснено появлением высших гармоник в стоячей волне при резонансе. Наиболее мощными из высших гармоник являются вторая и третья, которые и вызывают такие же правильные течения, как и основное колебание. Вторая гармоника дает одну дополнительную полосу и третья — две. Темные полосы соответствуют течениям от стенки трубки, светлые — притоку к стенкам. Течения, соответствующие темным полосам, пространственно совпадают с узлами основного колебания, второй и третьей гармоники. В стоячей волне будет наблюдаться заметная деформация.

Одна из дополнительных темных полос, видных на фотографии, значительно резче двух других дополнительных полос и почти не уступает по резкости полосе, полученной в узле основного колебания.

Заметим, что по пути распространения волны, излучаемой вибратором, сначала идут две более слабые полосы (первая из них слабее второй и едва различима), а затем более резкая. Можно сделать предположение, что форма волны искажена таким образом, что значения колебательной скорости и, следовательно, давления нарастают по ходу волны.

5. Влияние течений на теплоотдачу. В стоячих акустических волнах теплоотдача от стенки нагретого тела к окружающей среде заметно возрастает: коэффициент теплоотдачи возрастает в 2 раза и более. Наблюдаемая интенсификация процесса теплоотдачи вызывается довольно интенсивным притоком холодного окружающего воздуха к стенке тела в пучностях стоячей волны и отводом нагретого воздуха в ее узлах.

Количественная сторона явления зависит от интенсивности и частоты излучаемых колебаний, с одной стороны, и от величины подъемной силы, возникающей у нагретого тела при естественной конвекции, с другой.

Применяя теорию подобия, можно получить новый критерий, характеризующий наблюдаемые явления. Новый критерий механического подобия можно получить из уравнения движения, которое для рассматриваемого случая запишется в следующем виде:

$$\rho \frac{Dw}{dt} = -\rho g \beta \Delta t - \nabla P + \mu \nabla^2 w;$$

здесь $\rho g \beta \Delta t$ — подъемная сила и ∇P — градиент звукового давления.

Новый критерий имеет следующий вид:

$$K = \frac{P}{\rho g \beta \Delta t l}.$$

За характерный размер следует выбрать толщину l движущегося в нормальном направлении по отношению к стенке тела слоя. Примем эту толщину равной полуволне.

Критериальное уравнение необходимо искать в форме зависимости $Nu = f(K)$. Для нахождения критериального уравнения были проведе-

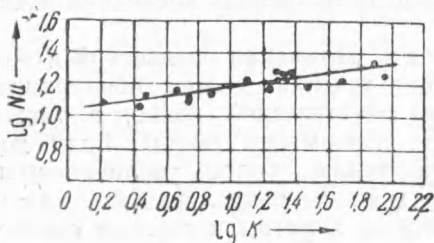


Рис. 4

ны опыты, в которых определялся коэффициент теплоотдачи при различных значениях произведения $Gr \cdot Pr$, причем нагретое тело помещалось в вынужденную стоячую волну, длина и интенсивность которой изменялись в указанных ранее пределах. Значение $Gr \cdot Pr$ изменялось в пределах от $25 \cdot 10^3$ до $100 \cdot 10^3$. Полученные опытом данные в логарифмической анаморфозе нанесены на график (см. рис. 4). Как видно из графика, несмотря на некоторый разброс точек, последние группируются около прямой, выражаемой уравнением $Nu = 10 K^{0,15}$.

Поступило
9 VII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Рэлей, Теория звука, 2, 1944. ² И. Г. Русаков, Журн. прикл. физ., 7, в. 5 (1930). ³ U. Ingard and S. Labate, Journ. Acoust. Soc. Am., 22, 2, 211 (1950). ⁴ С. Eckart, Phys. Rev., 73, 1 (1948). ⁵ А. А. Эйхенвальд, Усп. физ. наук, 14, в. 5, 552 (1934). ⁶ Л. Д. Розенберг, Звуковые фокусирующие системы, 1949. ⁷ E. N. Andrade, Proc. Roy. Soc. (A), 134, 445 (1931).