

08; 12

© 1993

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ
С КОМПОНЕНТАМИ ДОППЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ

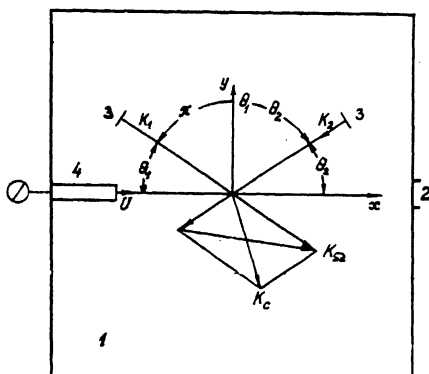
И.А. Колмаков

Возбуждение волн любой природы в движущейся среде „источником“ возмущений, находящимся в неподвижной среде, сопровождается изменениями длин этих волн на величину $\Delta\lambda$ относительно длины волны источника λ , пропорциональными скорости движения U . Принято считать, что аналогичная ситуация складывается и в случае, когда в области пересечения (ОП) двух или более пучков первичных волн создается течение, т.е. и в этом случае изменяются длины первичных волн и волн комбинационной частоты в ОП, но остаются неизменными их частоты. Генерируемые же ОП вторичные (в акустике – квадратичные) волны вне ОП будут иметь такую же частоту, что и при $U = 0$. В силу этого приемник сигналов, установленный в области, где $U = 0$, будет регистрировать частоту и длину волны комбинационной частоты такими же, как и при $U = 0$, т.е. без каких-либо доплеровских изменений во вторичном излучении.

Теоретическое исследование вопроса о взаимодействии первичных плоских волн в движущейся среде показало, что ОП первичных волн – „источник“ вторичных волн комбинационных частот, – генерирует одновременно волны двух видов на частоте „источника“ – „вынужденные“ и „собственные“, частота которых отличается от частоты вынужденных волн на величину, пропорциональную скорости движения среды в области пересечения U .

Теоретические предпосылки проверялись экспериментально и подтвердили основные выводы теории, в частности положение об одновременном присутствии двух видов комбинационных волн, один из которых имеет измененную по отношению к другому частоту, определяемую скоростью U . Заметим, что в экспериментах не ставилось целью установление точных соотношений между измеряемыми величинами, требующее значительного технического оснащения, а предполагалось лишь обнаружение эффекта изменения частоты вторичного излучения. Суть эксперимента заключалась в осуществлении взаимодействия двух пучков акустических волн в „затопленной“ струе воды, наблюдения вторичного излучения и сравнения его со случаем взаимодействия без струи. Схема эксперимента приведена на рисунке.

Эксперимент проводился в наполненной водой баке 1 вместимостью $V = 1.5$ м, в котором уровень воды за счет сливного отверстия 2 поддерживался постоянным. Пространственно разнесенные излучатели 3 акустических волн частот $\omega_1 = 5039$ и $\omega_2 =$



= 5000 кГц располагались на расстоянии 2–3 см от „поверхности“ струи, формируемой с помощью патрубка 4 под слоем воды, равным половине высоты бака 1. Излучатели располагались по одну сторону струи вблизи ее выхода из 4, приемник акустических сигналов 5 с полосой пропускания 40 кГц и диаметром $d = 2$ см – по другую сторону (использовались и другие варианты). Скорость струи варьировалась и могла превосходить 15 м/с. Для исключения влияния реверберационных волн стенки и дно бака покрывались каучуковыми листами толщиной 1 см, а преобразователи 3.5 и струя находились в одной плоскости, параллельной поверхности воды в 1. Кроме того, для дополнительного снижения уровня первичных волн в области приемника использовались акустические фильтры из фольги разной толщины и состава, предпринимались и другие меры предосторожности, исключающие возможность простого сложения первичных волн на приемнике. Во время проведения экспериментов преобразователи жестко фиксировались.

Эксперимент осуществлялся следующим образом. В точку струи вблизи патрубка 4 направлялись излучаемые 3 пучки акустических волн частот ω_1 и ω_2 . Затем кран закрывался и осуществлялось взаимодействие первичных волн в неподвижной среде, при этом на экране осциллографа наблюдалась огибающая разностной частоты $\omega_{\Omega} = \omega_1 - \omega_2$ с четкой линией контура. После этого кран вновь открывался, и тем самым осуществлялось наложение струи на область пересечения пучков первичных волн. Сразу после открытия крана на экране осциллографа наблюдалось уширение линии огибающей, свидетельствующее о регистрации приемником одновременно двух видов волн: „вынужденной“ на частоте „источника“ с частотой ω_{Ω} и возбуждаемой источником „собственной“ волны с частотой ω_{Ω}^* , пропорциональной скорости U .

В эксперименте величина уширения линии огибающей определялась ориентацией преобразователей относительно струи и друг друга, и скоростью U . В общем случае волновое число собственной волны комбинационной частоты с источниками вторичных волн, расположенными в движущейся среде, находится из выражения

$$k^* = \left\{ \frac{k_1^2}{\left(1 + \frac{U}{c} \cos \theta_1\right)^2} - \frac{k_2^2}{\left(1 + \frac{U}{c} \cos \theta_2\right)^2} - \frac{2k_1 k_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{\left(1 + \frac{U}{c} \cos \theta_1\right)\left(1 + \frac{U}{c} \cos \theta_2\right)} \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где θ_1, θ_2 - углы между $\vec{k}_{1,2}$ и \vec{U} ; $k_{1,2}$ - волновые числа первичных волн; c - скорость звука в среде; звездочка у символа указывает на зависимость от скорости U .

В эксперименте чаще использовалась схема встречного взаимодействия первичных волн, изображенного на рисунке, дающее большие значения изменения длины волны огибающей $\Delta\lambda_Q^*$. В этом случае при небольших и равных значениях углов θ_1 и θ_2 выражение для $\Delta\lambda_Q^*$ можно записать в виде

$$\Delta\lambda_Q^* \cong \frac{2\pi(k - k^*)}{k^2} \approx \frac{2\pi k_1 k_2 U c^{-1} \cos \theta}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_1 k_2 \cos(\pi - 2\theta)}}. \quad (2)$$

Здесь $\theta = \theta_1 = \theta_2$.

При $\theta = 10^\circ$, $U \sim 10$ м/с длина волны огибающей разностной частоты ~ 7.5 мм, а изменение длины волны $\Delta\lambda_Q^* \sim 0.21$ мм. При увеличении масштаба лишь в 10 раз длина волны на осциллографе становится равной 7.5 см, а $\Delta\lambda_Q^* = 2.1$ мм, т.е. изменение длины волны огибающей легко обнаруживается визуально. Заметим, что на экране осциллографа величина $\Delta\lambda_Q^*$ принимала и большие значения при том же увеличении длины волны. После закрытия крана огибающая вновь принимала первоначальную форму.

В силу того, что в эксперименте преобразователи находились вне струи, в области, где $U = 0$, справедлива зависимость для неподвижной среды: $\omega_Q = c \cdot \lambda_Q^*$ (где c - скорость звука в неподвижной среде, т.е. при $U = 0$). Из этого следует, что изменение длины волны огибающей разностной частоты можно объяснить только изменением частоты ω_Q .

Таким образом, из эксперимента следует, что взаимодействие волн в движущейся среде приводит к возникновению волн двух видов: на частоте „источника“ - волн, образуемых в ОП, и на частоте источника, но измененной на величину, пропорциональную скорости движения среды в ОП.

Исследованное в данном сообщении явление может найти многочисленные применения.

Поступило в Редакцию
17 марта 1993 г.