

# АКУСТИЧЕСКИЙ ЛУЧ В ПОЛЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЖИДКОСТИ

М.И.Скипа, Ю.А.Федорин

*Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины*  
Почтовый адрес: 65026, Одесса, ул. Преображенская,3  
Телефон: (8-482) 23-20-13  
Факс: (8-482) 23-35-32  
E-mail: acoustics@paco.net

1. Поле скоростей жидкости  $\mathbf{u}$  при постоянной объемной плотности источников  $q$  определяется, согласно известным законам гидромеханики [1], выражением

$$\mathbf{u} = \frac{1}{3} q \mathbf{r}, \quad (1)$$

т.е. является линейной функцией расстояния от начала координат. При  $q > 0$  (источники жидкости) поток направлен от начала координат в положительном направлении радиуса-вектора  $\mathbf{r}$ , а при  $q < 0$  (стоки жидкости) – в обратном. Ясно, что поток жидкости сферически симметричен. Речь пойдет, далее, о распространении звука в такого рода потоке.

2. Теперь имеются помещенный в начале отсчета приемник акустического сигнала и расположенный на расстоянии  $\mathbf{r}$  от него неподвижный излучатель. И приемник, и излучатель, находятся в потоке жидкости вида (1), причем приемник покоится относительно него, а излучатель движется – со скоростью  $\pm \mathbf{u}$  в зависимости от знака  $q$ .

Стандартный способ рассмотрения явлений в описанной ситуации состоит в следующем [2]. Имеется неподвижная система  $K$  координат  $\mathbf{r}$  и система  $K'$  координат  $\mathbf{r}'$ , движущаяся относительно системы  $K$  неравномерно со скоростью  $\mathbf{u}$ . В системе  $K'$  жидкость неподвижна и фаза монохроматической волны в ней имеет обычный вид:

$$\Theta = \mathbf{k} \mathbf{r} - kct, \quad (2)$$

где  $\mathbf{k}$  – волновой вектор,  $c$  – скорость звука в покоящейся жидкости.

Радиус-вектор  $\mathbf{r}'$  в системе  $K'$  связан с радиусом-вектором  $\mathbf{r}$  в системе  $K$  равенством

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \int_0^t \mathbf{u} dt, \quad (3)$$

поэтому в неподвижной системе координат фаза волны имеет вид:

$$\Theta = \mathbf{k}\mathbf{r} - \left( kc + \frac{\mathbf{k}}{t} \int_0^t \mathbf{u} dt \right) t. \quad (4)$$

Коэффициент при  $t$  есть частота  $\omega$  волны, так что в неравномерном потоке жидкости частота связана с волновым вектором  $\mathbf{k}$  соотношением

$$\omega = kc + \frac{\mathbf{k}}{t} \int_0^t \mathbf{u} dt. \quad (5)$$

Учитывая, что величина

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{t} \int_0^t \mathbf{u} dt \quad (6)$$

есть средняя скорость потока жидкости на пути волны между излучателем и приемником, находим окончательно:

$$\omega = kc + \mathbf{k}\bar{\mathbf{u}}. \quad (7)$$

Данная роль поля средних скоростей позволяет называть эффектом Доплера и случай волн, распространяющихся в неравномерно движущейся жидкости [3].

3. Из соотношения (7) путем стандартных рассуждений находим:

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{\bar{\mathbf{u}}}{c} \cos \varphi \right)^{-1}, \quad (8)$$

где  $\omega_0$  - частота испущенной волны,  $\omega$  - наблюдаемая частота волны,  $\varphi$  - угол между скоростью  $\bar{\mathbf{u}}$  и волновым вектором  $\mathbf{k}$ . Таким образом, в неравномерном потоке жидкости смещения частот происходят и для покоящихся друг относительно друга излучателя и приемника, если только они разделены пространственным интервалом. В рассматриваемом случае

$$\frac{\bar{\mathbf{u}}}{c} = 1 + \frac{u/c}{\ln\left(1 - \frac{u}{c}\right)} \approx \frac{1}{2} \frac{u}{c} = \frac{qr}{6c}, \quad (9)$$

так что для медленно меняющихся течений жидкости

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{qr}{6c} \cos \varphi \right)^{-1}, \quad (10)$$

где  $r$  – расстояние между излучателем и приемником.

На основании последнего результата для относительного изменения частоты  $z$  при радиальном распространении акустического луча получаем:

$$z = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{\bar{\mathbf{u}}}{c} = \frac{qr}{6c}. \quad (11)$$

При  $q > 0$  (источник жидкости) наблюдается «синее» смещение частот, а при  $q < 0$  (сток жидкости) – «красное» смещение. На рис.1 изображена общая картина зависимости величин

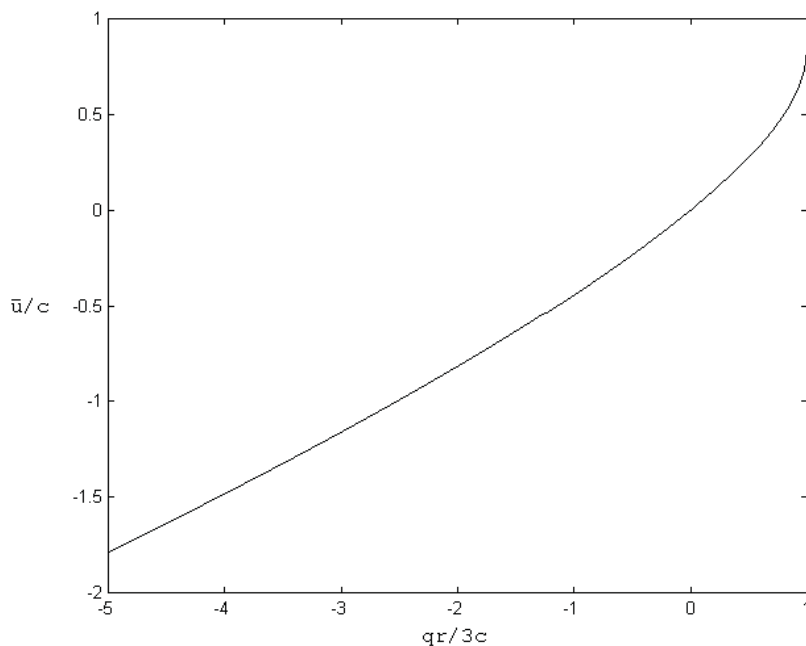


Рис. 1

$\bar{u}$  і  $\tau$  друг від друга, причем лінійна залежність между ними наблюдается лишь при достаточной близости к началу отсчета. Кроме того, ввиду направления течения при пространственном стоке жидкости не существует предельного расстояния, откуда не смог бы поступить сигнал от излучателя. На бесконечности величина  $z$  достигает минимального значения минус единица, а наблюдаемая частота обращается в нуль.

Эти рассуждения применимы к проблемам гидроакустики моря, а также к задачам динамики водных потоков, содержащих растворенные вещества. Вообще говоря, доплеровский сдвиг частот в неравномерном потоке жидкости давно уже не новость для акустики и рассматривается, например, в работах [3,4]. В связи с этим известное космологическое красное смещение может оказаться следствием потока некоторого невидимого вещества вглубь объектов в целом стационарной Вселенной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1978. - 736с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М. : Наука, 1986. - 733с.
3. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. – М. : Мир, 1981. - 598с.
4. Осташев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. – М. : Наука, 1992. - 206с.