

В этих условиях описанный характер зависимости эффекта колебаний газового потока от его скорости должен способствовать интенсификации теплообменных и аналогичных им процессов в большей степени в областях замедленного газового потока, нежели там, где газовый поток обладает большой скоростью. Последнее же, способствуя более равномерной работе слоя, обеспечит улучшение показателей процесса в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Н. Кубанский. Интенсификация теплообмена ультразвуком. Теплоэнергетика, 1962, 11, 75—79.
2. И. А. Бокун, В. С. Забродский. Экспериментальное исследование теплообмена между пульсирующим слоем и поверхностью нагрева. В сб. «Исследование тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах». Минск, «Наука и техника», 1966, 27—32.
3. С. С. Забродский, А. Л. Парнас. О возможности интенсификации междуфазового тепло- и массообмена в газозвеси пульсирующим резонансным потоком. Инж. физ. ж., 1965, 6.
4. P. D. Richardson. The influence of sound on heat transfer in separated flows. Chem. Eng. Sci., 1966, 21, 67, 609—610.
5. А. С. Штейнберг. О влиянии колебаний на теплообмен между потоком газа и поверхностью твердых тел. Теплоэнергетика, 1966, 8, 75—77.
6. А. Н. Плановский, В. А. Сви́нarov, А. П. Фокин, С. П. Рудопашта. Исследование массоотдачи от тел сферической формы к газовому потоку. В сб. «Общие вопросы тепло- и массообмена. Минск, «Наука и техника», 1966, 3—9.
7. Ю. А. Борисов, И. М. Гинкина. Опыты по сушке коллоидных материалов в стоячей звуковой волне. Акуст. ж., 1966, 12, 1, 107—109.
8. H. V. Fairbanks, R. E. Cline. Acoustic drying of coal. Col. Eng., 1967, 44, 519, 184—187.
9. И. Н. Фиклистов, Г. А. Аксельруд. Кинетика массообмена между слоем твердых частиц и пульсирующим потоком жидкости. Инж.-физ. ж., 1966, 10, 4, 531—537.
10. Б. С. Фиалков. Контроль движения шихтовых материалов над зонами горения. Изв. вузов, Черная металлургия, 1961, 10, 19—25.
11. В. Т. Плицын, Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов. Изучение зон горения кокса в доменной печи на основе электронно-ионных явлений. Изв. вузов, Черная металлургия, 1966, 10, 22—28.
12. H. Schenck, I. Clots. Исследование влияния пульсаций газового потока на восстановление окислов железа. Stahl und Eisen, 1960, 80, 22, 33, 1453—1457.

Карагандинский филиал института  
горючих ископаемых  
Министерства угольной промышленности СССР

Поступило в редакцию  
22 марта 1968 г.

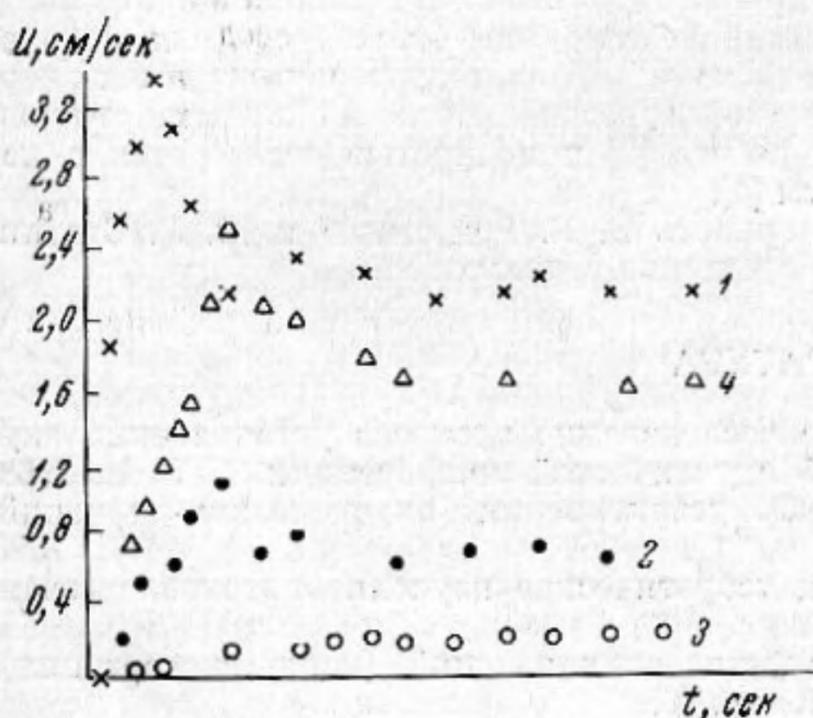
УДК 534.222.1

### К ВОПРОСУ ОБ УСТАНОВЛЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

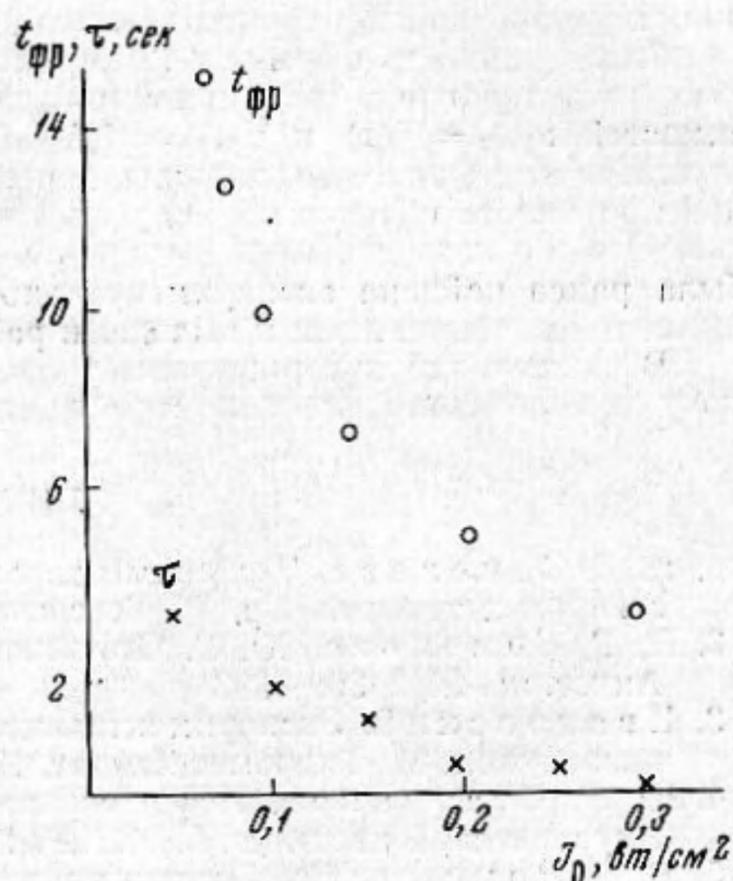
Н. Г. Семенова

В работе [1, 2] было показано, что характер процесса установления скорости акустического течения может быть различным. Он может быть представлен либо в виде монотонной функции, близкой к экспоненте, либо в виде немонотонной функции с максимумом скорости в момент времени  $t_{\text{фр}}$  и с дальнейшим спаданием скорости течения до практически постоянного значения  $u_{\text{уст}}$ . В отличие от многих других нелинейных акустических явлений оказалось, что вид функции определяется не величиной акустического числа Рейнольдса ( $Re_{\text{ак}} = P/b\omega$ , где  $P$  — амплитуда звукового давления,  $b = \frac{4}{3}\eta + \eta'$ ,  $\eta$  и  $\eta'$  — соответственно сдвиговая и объемная вязкости,  $\omega$  — круговая частота), а величиной энергии звука поглощенной средой. Этот факт иллюстрируется фиг. 1, где представлены зависимости мгновенных значений скорости потока  $u$  от времени при постоянном акустическом числе Рейнольдса  $Re_{\text{ак}} = 145$  (кривые 1, 2, 3). Параметром кривых является величина средней интенсивности звука, вводимой в среду. Работа проводилась в импульсном режиме, так как только в этом случае можно изменять интенсивность звука, оставляя неизменным акустическое число Рейнольдса. Кривые 1, 2, 3 сняты в воде на частоте 1,25 Мгц (диаметр излучателя 20 мм) на расстоянии 25 см от излучателя при интенсивностях у его поверхности соответственно 18,3 вт/см<sup>2</sup> ( $\tau = 800$  мксек,  $f_{\text{след}} = 50$  гц), 4,6 вт/см<sup>2</sup> ( $\tau = 400$  мксек,  $f_{\text{след}} = 25$  гц) и 1,1 вт/см<sup>2</sup> ( $\tau = 200$  мксек,  $f_{\text{след}} = 12,5$  гц). Метод

измерения скорости потока и характеристик поля описан в работе [2]; каждая экспериментальная точка есть среднее из 7—10 измерений. Кривые 1, 2, 3 показывают, что при определенной интенсивности звука или, по-видимому, в конечном итоге величине скорости установившегося течения, ей соответствующей, изменяется характер процесса установления акустического потока. Кривая 4, приведенная на той же фигуре, получена при  $Re_{ак} < 1$ . Она снята в воде при интенсивности звука  $0,27 \text{ вт/см}^2$  на частоте  $10 \text{ Мгц}$ . Хотя интенсивность звука в последнем случае много меньше (скорость потока больше), чем для кривой 3, тем не менее кривая 4 имеет интересный нас максимум. Таким образом, именно величиной акустической скорости установившегося течения и определяется вид процесса его установления.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 2 показано изменение с интенсивностью времени достижения потоком максимальной скорости  $t_{фр}$  и времени обнаружения потока в точке наблюдения  $\tau$ , расположенной на расстоянии  $21 \text{ см}$  от излучателя в метиловом спирте на частоте  $10 \text{ Мгц}$ . Видно, что с увеличением интенсивности звука время появления пика скорости уменьшается, что по-видимому, связано с увеличением скорости перемещения пика. Время обнаружения течения  $\tau$  проявляет ту же тенденцию.

Отношение величины максимума скорости потока к ее установившемуся значению ни от  $Re_{ак}$ , ни от средней интенсивности звука вблизи излучателя в рассмотренном интервале этих величин практически не зависит, оставаясь всегда в пределах  $(1,5 \div 2)$ ; значение же самой скорости установившегося течения с изменением  $I_{ср}$  и  $Re_{ак}$  изменяется.

Скорость установившегося течения для кривой 4 (фиг. 1) при непрерывном излучении звука вычисляется по формуле Ивановского для  $Re_{ак} \ll 1$  [3], а при значениях  $Re_{ак} \gg 1$  скорость установившегося течения  $u_{уст}$  в непрерывном режиме описывается найденным Статниковым выражением [4]

$$u_{уст} = 10^{-4} \frac{k^2 r^2 \varepsilon}{b \omega} \rho_0 v_0^3, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = \frac{\gamma + 1}{2} \approx 4$ ,  $k$  — волновое число,  $r$  — радиус звукового пучка,  $\omega$  — круговая частота,  $\rho_0$  — плотность среды,  $v_0$  — амплитуда колебательной скорости. При импульсном режиме работы излучателя пользоваться данной формулой непосредственно нельзя. Если исходить из физических представлений о механизме возникновения течений в случае волн конечной амплитуды, когда коэффициент поглощения возрастает в  $\varepsilon Re_{ак}$  раз, а скорость течения определяется потерей количества движения, пропорциональной средней излучаемой энергии, то формулу (1) для импульсного излучения можно переписать следующим образом:

$$u_{уст} = 10^{-4} \frac{2k^2 r^2 \varepsilon}{\rho_0 c^2} I_{ср} \tau f_{след}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость звука в среде,  $I_{ср} = I_{имп} \cdot \tau \cdot f_{след}$ ,  $\tau$  — длительность импульса,  $f_{след}$  — частота следования импульсов.

Значения скоростей, вычисленные по формуле (2) для ряда значений звукового давления, и экспериментально измеренные скорости установившегося течения при тех же звуковых давлениях представлены в таблице:

Амплитуда звукового давления, атм	17,2	12,5	10,9	8,1	6,0
Вычисленная скорость установившегося течения, см/сек	1,40	0,60	0,30	0,19	0,06
Измеренная скорость установившегося течения, см/сек	1,4	0,7	0,4	0,15	0,07

Видно, что расхождения между вычисленными и экспериментальными значениями удовлетворяют точности метода измерения скоростей течения ( $\approx 20\%$ ).

Справедливость формулы (2) и, следовательно, положенных в ее основу физических представлений, была подтверждена также экспериментальной проверкой зависимостей  $u_{уст} = f(\tau)$  и  $u_{уст} = f(f_{след})$  при  $Re_{ак} = const$ . Их линейный характер отражает тот факт, что скорость течения тем больше, чем больше средняя по времени плотность излучаемой энергии и чем больше, следовательно, поглощенная энергия. Что же касается зависимости  $u_{уст}$  от акустического числа Рейнольдса, то она была ранее найдена экспериментально в работе [5] и полностью согласуется с нашими предположениями и выводами работы [4].

В заключение автор выражает благодарность Е. В. Романенко и Ю. Г. Статникову за постоянное внимание к работе и обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Семенова. Экспериментальное исследование процесса установления акустических течений. Тр. VI Всесоюзной акустической конференции, БУ5, М., 1968.
2. Н. Г. Семенова, Ю. Г. Статников. Об установлении акустических течений. Акуст. ж., 14, 2, 300—302.
3. Ивановский. Экспериментальное и теоретическое изучение потоков, вызванных звуком. М., Гидрометеиздат, 1959.
4. Ю. Г. Статников. Исследование акустических течений (канд. диссертация), Акустический институт АН СССР, 1967, стр. 76.
5. Е. В. Романенко. Экспериментальное исследование распространения волн конечной амплитуды в жидкостях (канд. диссертация), Акустический институт АН СССР, 1961.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступило в редакцию  
22 июля 1968 г.