АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том X 1964 Вып. 4

УДК 534.29:069.8

# О КИНЕТИКЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В ДОКАВИТАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

*О. А. Капустина*

Рассмотрена зависимость степени дегазации жидкости под действием ультразвука (на частоте 1,13 *мггц* в докавитационном режиме) от времени озвучивания. Получено эмпирическое выражение, описывающее кинетику процесса ультразвуковой дегазации жидкости.

Известно, что под действием ультразвуковых колебаний достаточной интенсивности в жидкости образуются пузырьки газа. Постепенно увеличиваясь, они, в конце концов, всплывают и покидают жидкость — так происходит процесс ультразвуковой дегазации.

Согласно имеющимся в литературе данным, ультразвуковая дегазация жидкости происходит в результате ряда различных по своей природе, но взаимосвязанных процессов. Некоторые авторы [1, 2] полагают, что дегазация начинается с образования кавитационных зародышей, которые затем заполняются газом, растворенным в жидкости. По мнению других, [3] дегазация определяется диффузией газа, растворенного в жидкости в радиально колеблющиеся газонаполненные пузырьки весьма малого размера; причины существования таких микропузырьков в жидкости окончательно не выяснены. В следующей стадии процесса дегазации происходит рост пузырьков. Этот рост вызван рядом эффектов, обусловленных ультразвуком, как, например, «выпрямленной» диффузией [4, 5], возможным увеличением коэффициента диффузии в ультразвуковом поле [6], разрушением мономолекулярного слоя, окружающего пузырек [7]. Третья стадия процесса дегазации состоит в коалесценции пузырьков, причем причины ее вызывающие, различны на низких и высоких частотах [8, 9]. Образовавшиеся крупные пузырьки всплывают на поверхность жидкости; на этой последней стадии дегазации действие ультразвука наименее существенно. Однако механизм ультразвуковой дегазации нельзя выяснить в полной мере, не изучив основные физические закономерности процесса: кинетику процесса, влияние различных акустических факторов и так далее.

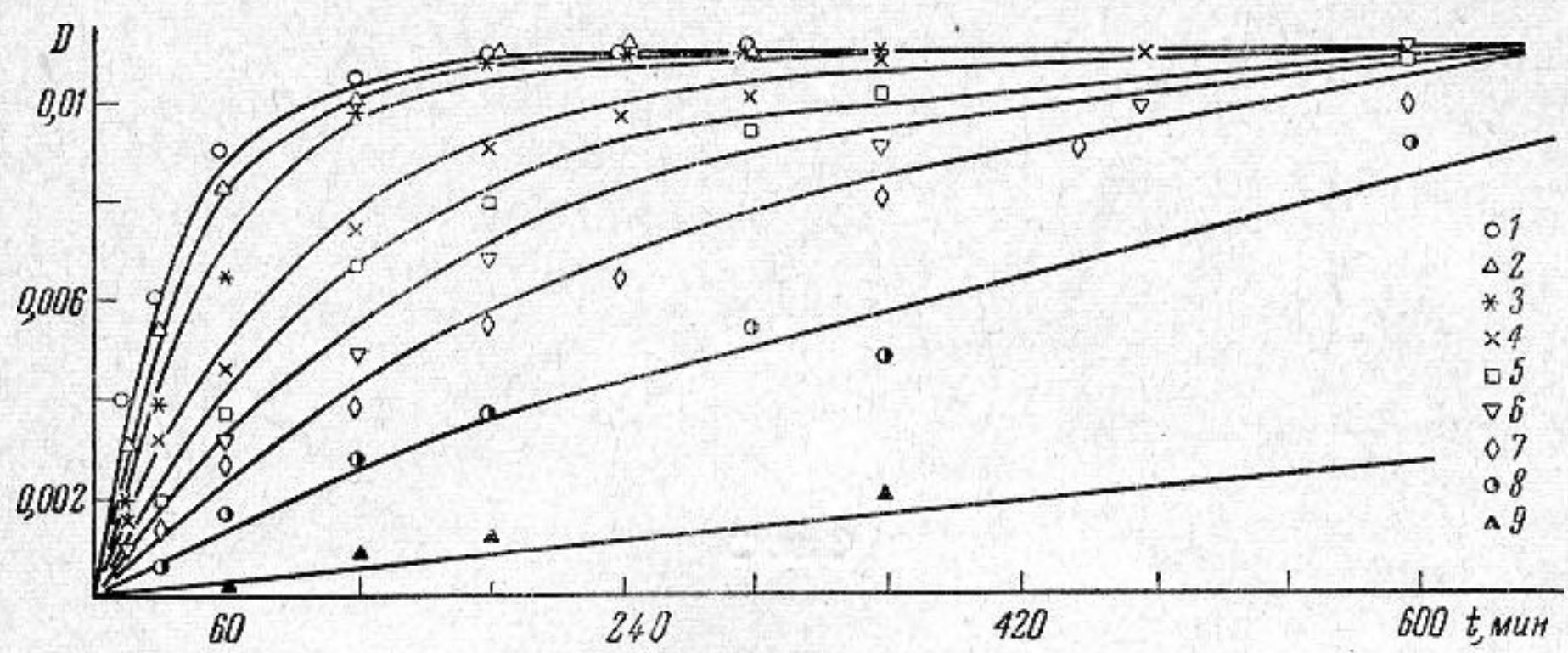
Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию кинетики процесса дегазации жидкости под действием ультразвука на частоте 1,13 *мггц*, причем вследствие высокого кавитационного порога, дегазация жидкости на этой частоте в диапазоне использованных интенсивностей ($0{,}7 \div 0{,}04$ *вт/см*$^2$) не сопровождалась кавитационными явлениями, которые весьма осложнили бы исследование.

В качестве излучателя использовалась колеблющаяся по толщине пластинка из титаната бария, диаметром 118 *мм*, закрепленная в специальном держателе. Исследуемая жидкость — вода с объемной концентрацией воздуха 0,0254 заливалась в стеклянный термостатируемый реакционный стакан (диаметром 90 *мм*) с дном из звукопроницаемой тонкой пленки. Количество воздуха, выделившегося под действием ультразвука из жидкости, определялось методом, описанным в работе [10], путем измерения

абсолютного содержания газа $v_0$ и $v_i$ в определенном объеме воды $V$ соответственно до и после озвучивания [11].

Исследуемая жидкость озвучивалась в течение промежутков времени от 15 до 600 *мин* при различных значениях вводимой акустической мощности (от 2,5 до 45 *вт*). Последняя определялась по радиационному давлению. При каждом опыте определялось удельное содержание газа в жидкости до и после озвучивания и вычислялась степень дегазации $D = (v_0 - v_i) / V$, т. е. количество воздуха, выделяющегося под действием ультразвука из единицы объема жидкости.

На фиг. 1 приведены экспериментальные данные о зависимости степени дегазации $D$ от времени озвучивания $t$. Обозначения *1—9* отвечают




Фиг. 1

следующему ряду градаций акустической мощности: 45; 40; 31; 22; 13,5; 10,5; 8; 4,3 и 2,5 *вт*. Из фигуры видно, что при увеличении времени озвучивания степень дегазации $D$ увеличивается и достигает некоторого предельного значения $D_0$. В наших экспериментах величина предельной степени дегазации составляла 0,0109 и не зависела от величины вводимой акустической мощности. Однако время $t_0$, необходимое для достижения значений $D = D_0$, как следует из приведенных на фиг. 1 графиков, уменьшается с увеличением акустической мощности. Существование предельной степени дегазации $D_0$, очевидно, связано с достижением некоторого равновесного состояния в двухфазной системе вода — воздух. Дело в том, что ультразвук не только вызывает дегазацию жидкости, но под действием потоков в звуковом поле, по-видимому, ускоряется конвективная диффузия. Таким образом, наступает такой момент, когда выделение воздуха из жидкости полностью компенсируется поступлением его в жидкость через поверхность раздела вода — воздух.

Обработка полученных данных показала, что изменение величины степени дегазации может быть аппроксимировано выражением

$$D(t) = D_0(1 - e^{-\alpha t}), \tag{1}$$

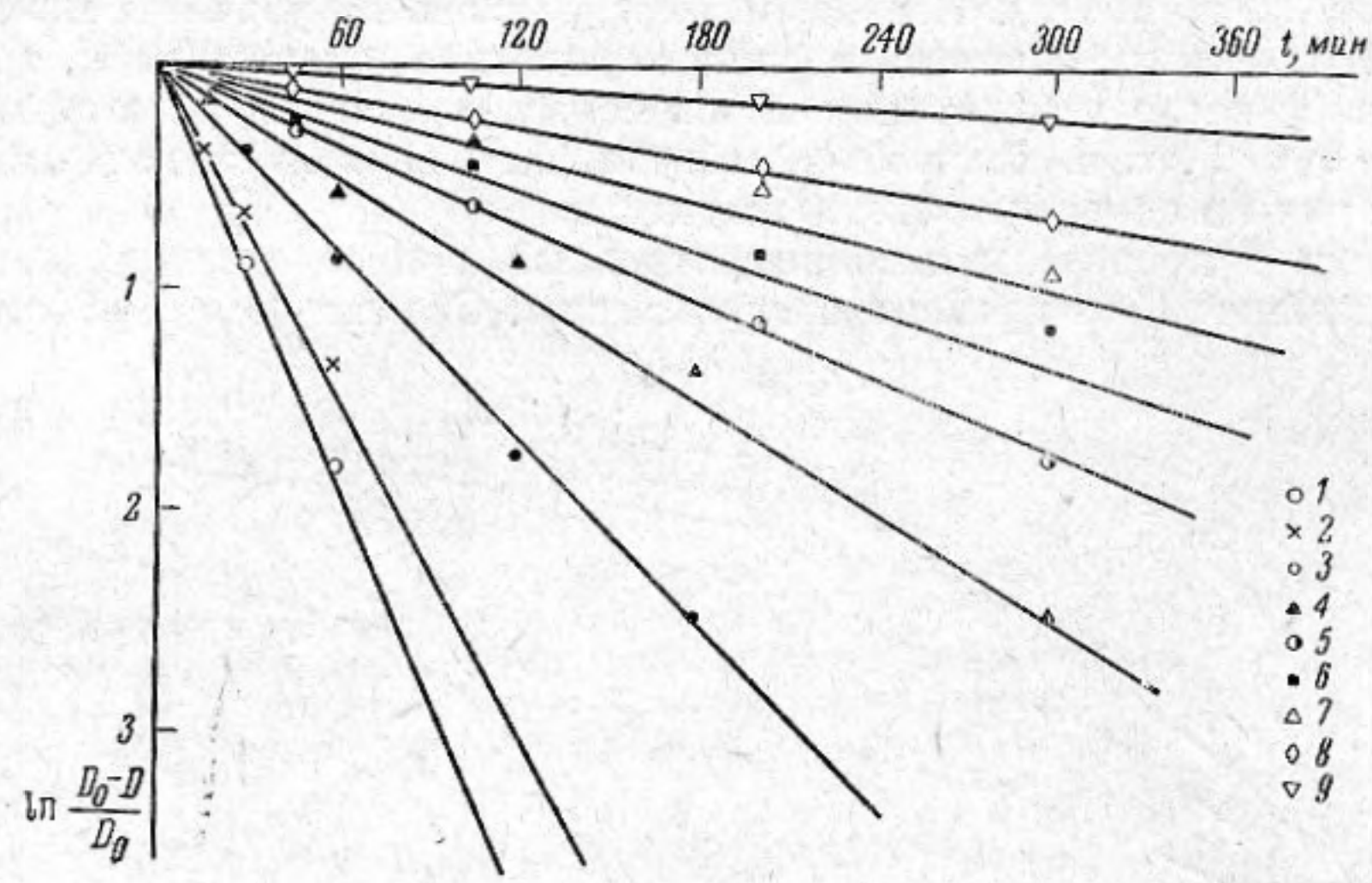
где $D(t)$ — мгновенное значение степени дегазации, $D_0$ — предельная степень дегазации, $t$ — время озвучивания, а $\alpha$ — коэффициент дегазации. Значения $\alpha$ могут быть получены путем построения семейств кривых $D(t)$ в логарифмическом масштабе ординат (фиг. 2 и 3). На фиг. 3 представлена зависимость коэффициента дегазации $\alpha$ от вводимой акустической мощности. Эта зависимость хорошо описывается выражением

$$\alpha = a(W - W_0)^n \tag{2}$$

(сплошная кривая), где $W_0$ — полученное экспериментально пороговое значение акустической мощности, при котором наблюдается возникнове-

ние дегазации, составляющее в наших экспериментах 2 *вт*, что соответствует удельной мощности $3{,}3 \cdot 10^{-3}$ *вт/см*$^3$.

Воспользовавшись выражением (2) для коэффициента дегазации $\alpha$ и определив постоянные $a$ и $n$, можно представить формулу (1), описы-

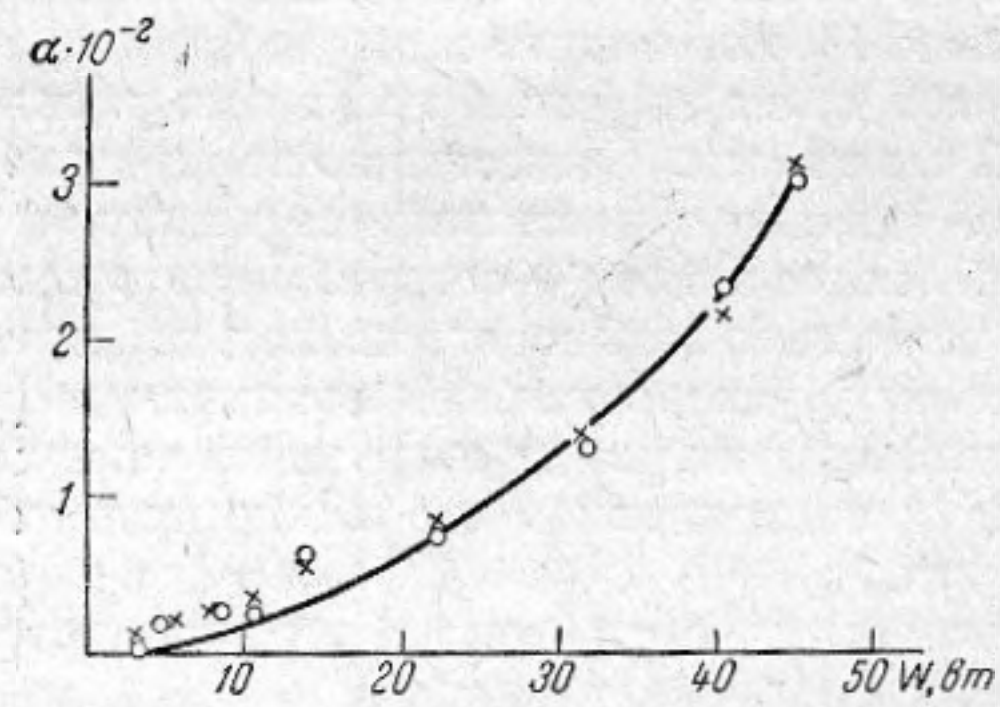



Фиг. 2

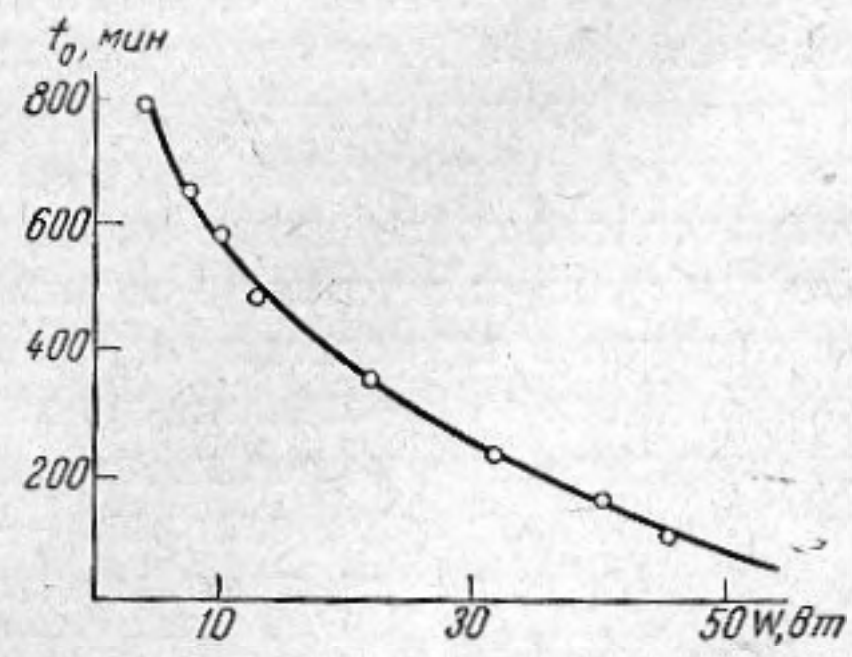
вающую кинетику процесса дегазации, для условий нашего эксперимента в следующем виде:

$$D(t) = 0{,}0109\left(1 - e^{-8{,}25\cdot 10^{-4}(W-2)^{0{,}905}t}\right), \tag{3}$$

где $W$ — акустическая мощность в ваттах, $t$ — время озвучивания в минутах. Кривые на фиг. 1 построены в соответствии с выражением (3). Из формулы (3) легко рассчитать время «насыщения» $t_0$ для кривых,




Фиг. 3




Фиг. 4

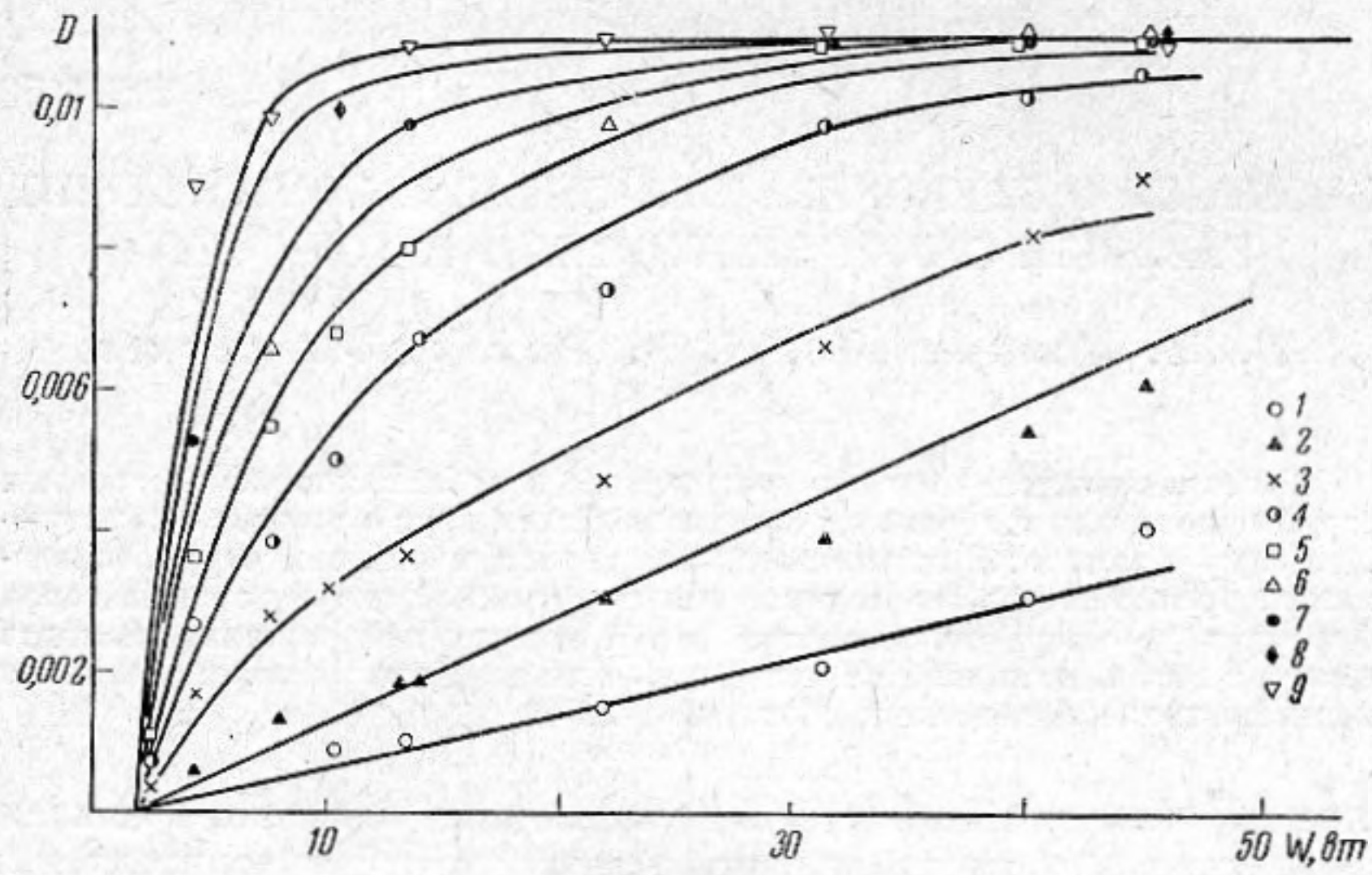
представленных на фиг. 1, и получить зависимость величины $t_0$ от акустической мощности в виде следующего соотношения:

$$t_0 = \frac{\ln(D_0 \cdot 10^4)}{a(W - W_0)^n}, \tag{4}$$

где $t_0$ — выражено в минутах, $W$ — в ваттах (фиг. 4).

На фиг. 5 полученные нами экспериментальные результаты представлены в несколько ином виде как зависимость величины степени дегазации $D$ от акустической мощности при различном времени озвучивания. Обозначения *1—9* на фигуре отвечают следующему ряду времени

озвучивания: 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 480 и 600 *мин*. Из фигуры видно, что при малых временах озвучивания (15 и 30 *мин*) эта зависимость носит линейный характер [10]. Фактическое отклонение от линейности во всех остальных случаях связано с понижением скорости дегазации в связи с приближением к предельной степени дегазации $D_0$.




Фиг. 5

Следует заметить, что формула (3) описывает кинетику процесса дегазации для некоторого частного случая: определенного внешнего давления $P_A$, температуры озвучиваемой жидкости (T = 17°) и определенного начального содержания газа в жидкости $C_0 = 0{,}0254$.

## ЛИТЕРАТУРА


1. O. Lindström. Physico-chemical aspects of chemically active ultrasonic cavitation in aqueous solution. J. Acoust. Soc. America, 1955, **27**, 654—671.
2. E. N. Noltingk. The effects of intenses ultrasonics in liquids. Handbuch der Physik, 1962, 11/2, 259—287.
3. R. Esche. Moderne Ultrachallanlagen für Reininung, Entgasung und Dispergirung. Electrotechnische Z., 1960, 5, 3—10.
4. R. Strasberg. Onset of ultrasonic cavitation in tap water. J. Acoust. Soc. America, 1959, 31, 163—176.
5. W. Güth. Kinematographische Untersuchungen der Schwingungskavitation. Acustica, 1954, **7**, 211—214.
6. M. Okyama, T. Hirose. Mechanics on the cavitation produced by ultrasonics. J. Acoust. Soc. Japan, 1957, **13**, 7—20.
7. T. Fox, U. Herzfeld. Gas bubbls with organic skin as cavitation nuclei. J. Acoust. Soc. America, 1954, **26**, 6, 984—989.
8. В. Ф. Казанцев. Движение газовых пузырьков в жидкости под действием сил Бьеркнеса, возникающих в акустическом поле. Докл. АН СССР, 1951, 129, 1, 64—67.
9. F. G. Blake. Bjerkness forces in stationary sound fields. J. Acoust. Soc. America, 1949, **21**.
10. О. А. Капустина. О зависимости степени и эффективности ультразвуковой дегазации жидкости от излучаемой мощности. Акуст. ж., 1963, 9, 4, 424—426.
11. Winkler. Chemisch-technische Untersuchungsmetoden. Lunge Berl., 1921, **1**, 558—578.



Акустический институт АН СССР
Москва



Поступила в редакцию
16 января 1964 г.