

с помощью $1/2$ -октавных фильтров в диапазоне частот 100—11 300 гц. Полученные значения приводились к полосе частот 1 гц и выражались в децибелах, отсчитываемых от уровня $2 \cdot 10^{-5}$ н/м². Найденные спектры распределялись в 4 группы, каждая из которых включала спектры, относящиеся к интервалу скоростей ветра для соответственного балла по шкале силы ветра, используемой в СССР. Число спектров в каждой группе 10—15. По каждой группе вычислялись математическое ожидание $P(f)$ и среднее квадратичное отклонение σ для средних частот фильтров f , характеризующее случайный разброс спектральных уровней подводного шума для данного балла силы ветра. Следует отметить, что закон распределения спектральных уровней подводного шума в нашем случае отличается от рэлеевского. Полученные величины для 4 значений силы ветра приведены на фиг. 1, 2. Сила ветра в баллах, средняя скорость ветра v и интервал значений скорости ветра Δv для каждой кривой даны в таблице.

В диапазоне частот от 20—40 до 5000 гц полученные средние спектры близки к данным Венза [1] для мелкой воды при слабых шумах отдаленного судоходства. На частотах от 2 до 20—40 гц средний наклон спектров подводных шумов значительно меньше, чем полученный в работах [1, 2] и составляет от $-3,5$ до -5 дб/окт, а спектральные уровни на частотах 2—40 гц на 10—26 дб ниже полученных в работе [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. G. W e n z. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. J. Acoust. Soc. America, 1962, 34, 12, 1936—1956.
2. В. И. Бардышев, С. И. Воронина. Экспериментальные исследования зависимости подводного шума океана от скорости ветра. Тр. Акустического ин-та АН СССР, 1968, 15, 4, 143—150.
3. Д. И. Блохинцев. Акустика неоднородной движущейся среды. М.—Л., Гостехиздат, 1946.

Акустический институт АН СССР
Москва

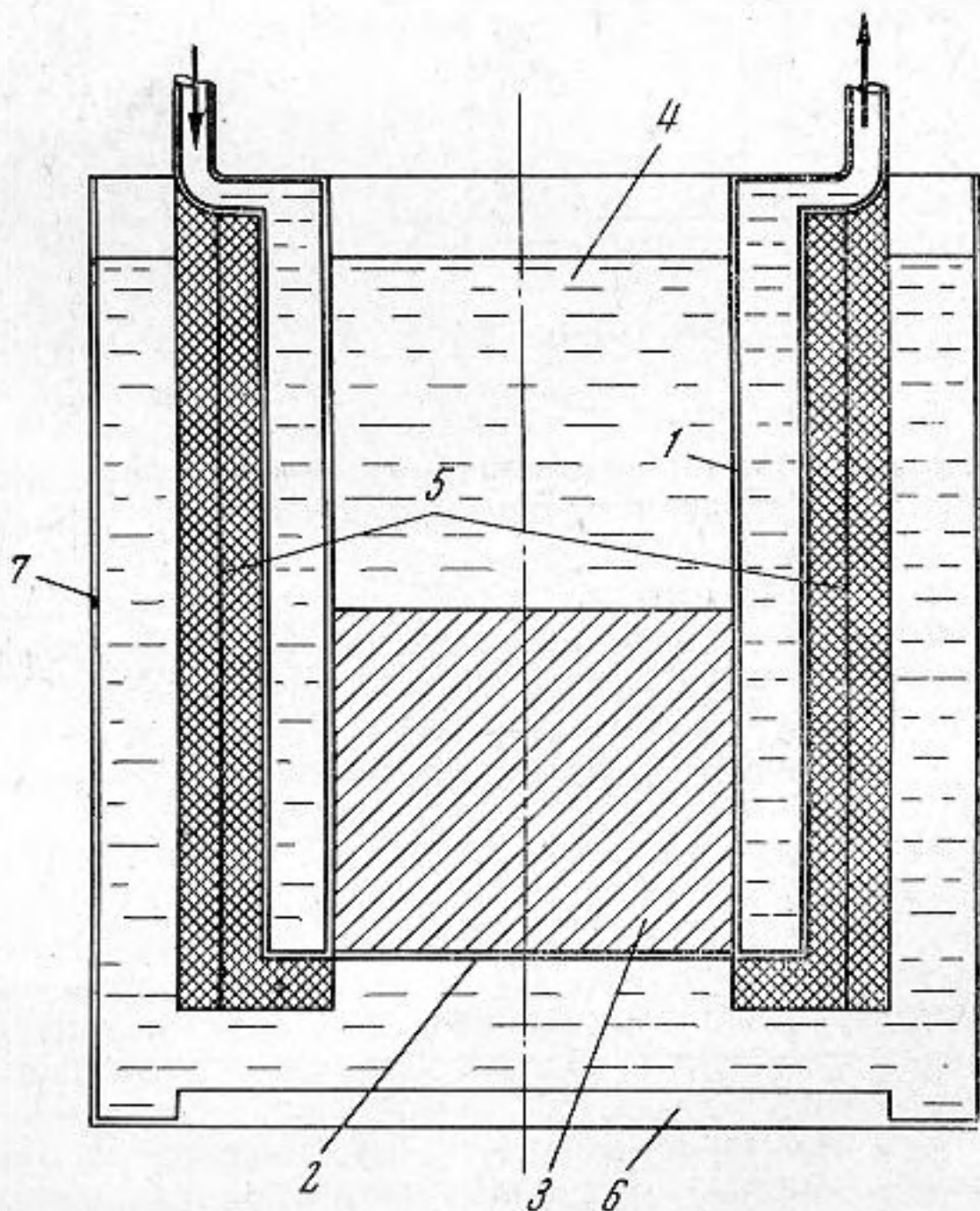
Поступило в редакцию
18 июля 1969 г.

УДК 534.29

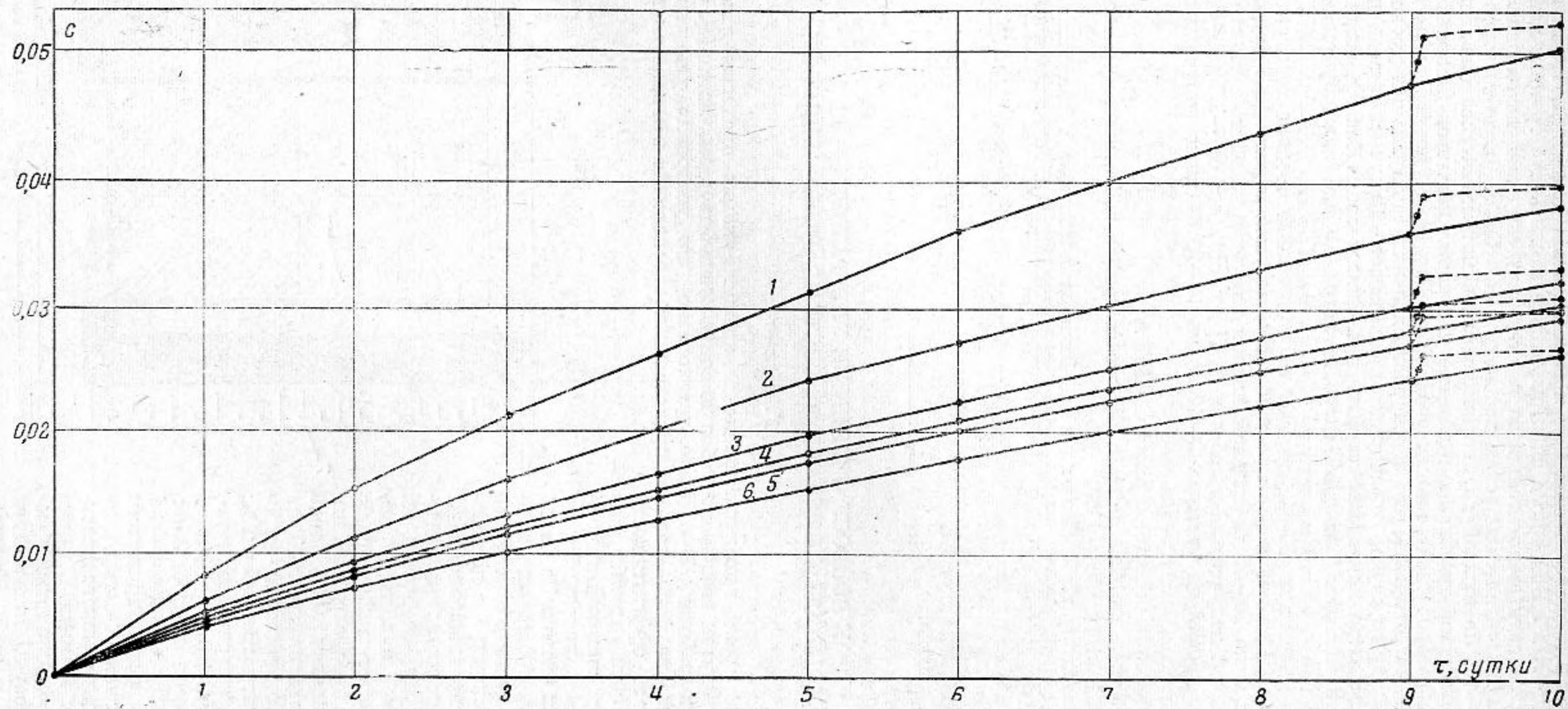
К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ В СИСТЕМЕ ГЕЛЬ—ЖИДКОСТЬ

Б. Г. Белов

В последнее время находит применение интенсификация процессов ультразвуковой обработки путем введения в рабочую среду мелких твердых частиц [1]. В ранее опубликованных работах [2—5] было установлено, что ускорения ультразвуковой диффузии в системе гель—гель не происходит и что наличие в жидкости твердых частиц повышает эффективность ультразвука. Нами произведены исследования с системой гель—жидкость при использовании мелких твердых частиц. На фиг. 1 показана схема проведения опытов. Рабочим сосудом служил стеклянный цилиндр 1 с двойными стенками; прохождение воды в рубашке обеспечивало постоянство температуры в цилиндре. Снизу цилиндра 1 находилась полиэтиленовая пленка 2, хорошо пропускающая ультразвук. В цилиндр 1 заливался 0,1% гель агар—агара, приготовленный на водном растворе красителя—тропеолина с концентрацией 0,1%; сверху, после застудневания геля 3 заливался растворитель 4 (дистиллированная вода). Зная объем раствора, по изменению его концентрации фотометрическим путем [2] определялось количество продиффундировавшего красителя в единицу времени. С целью исключения вибрации стенок сосуда рабочий сосуд 1 был обклеен слоем губчатой резины 5 толщиной около 10 мм. Ультразвуковые колебания, создаваемые магнито-



Фиг. 1



Фиг. 2

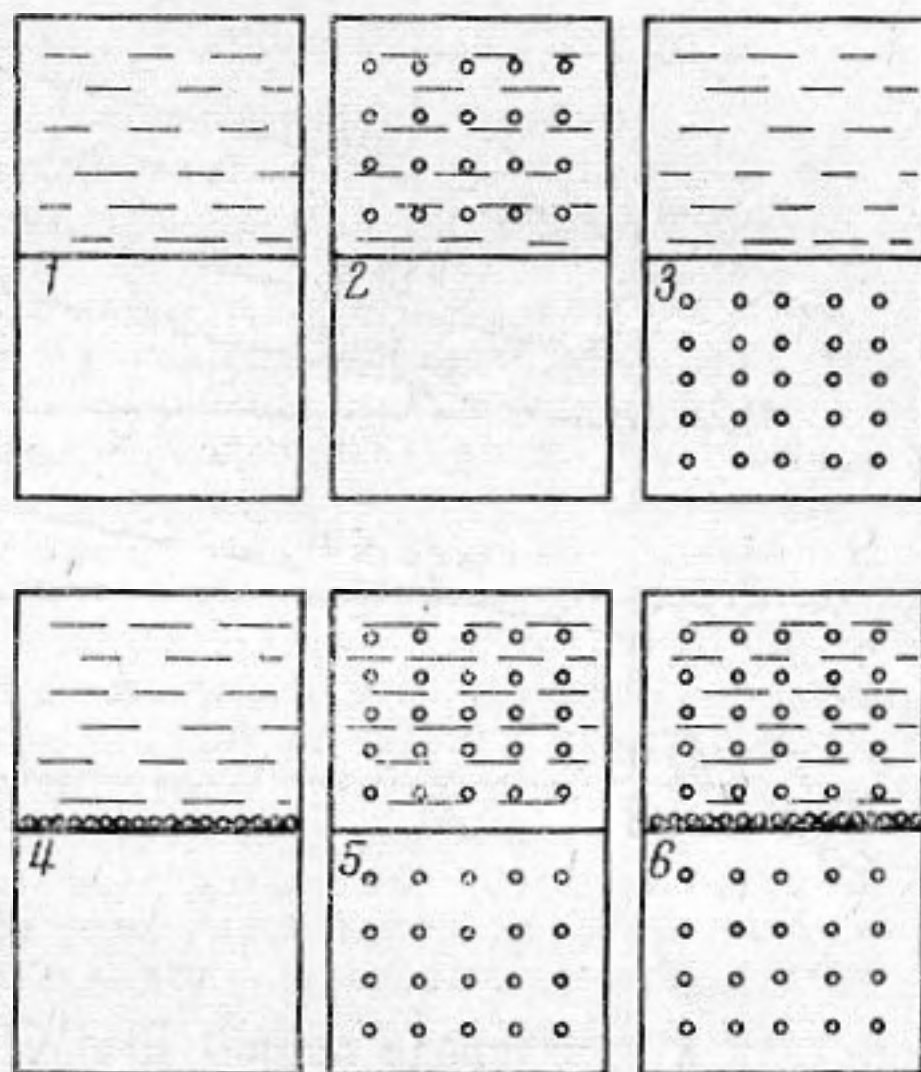
стрикционным излучателем 6, проходили через пленку 2 и ускоряли диффузию в системе гель — жидкость. Применение излучателей одинаковой мощности на 10, 16, 20 кгц показало, что скорость диффузии не зависит от частоты в диапазоне 10—20 кгц. Размеры диаметров сосудов выбирались так, чтобы площади их поперечных сечений были кратны целым числам, а высота сосудов была постоянной и равнялась 100 мм. На фиг. 2 представлены кинетические кривые диффузии тропеолина из геля в жидкость при $t = 5^\circ$ в сосудах с площадью сечения $s_1 = 3200$ (1), $s_2 = 2400$ (2), $s_3 = 2000$ (3), $s_4 = 1870$ (4), $s_5 = 1800$ (5), $s_6 = 1600$ (6) мм². По оси ординат на фигуре отложена концентрация красителя в гр/100 гр воды (C) по оси абсцисс — время в сутках. На фиг. 2 видно, что концентрация тропеолина за 10 суток изменилась от 0 до 0,05%. При каждом замере раствор перемешивался и каждые 30 мин концентрация раствора у границы твердой фазы увеличивалась на

$$\frac{0,05\%}{2 \times 24 \times 10} = 0,0001\%.$$

Такая незначительная, почти равномерная, увеличение концентрации раствора позволило предположить, что исследуемый процесс диффузии являлся квазистационарным процессом, к которому применим 1-й закон Фика. Изучение кинетических кривых диффузии (фиг. 2, 1—6) показало, что спустя 8—9 суток после начала процесса поток диффузии в каждом сосуде пропорционален площади раздела фаз. Эта закономерность выполнялась и для озвученных образцов: приросты количеств продиффундировавших веществ под влиянием ультразвука относятся друг к другу как площади сечений сосудов $s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : s_5 : s_6$ (фиг. 2, 1—6 пунктир). Режим озвучивания образцов при $t = 5^\circ$: частота колебаний 10 кгц, время озвучивания 2 час, интенсивность звука создаваемая преобразователем 0,5 вт/см².

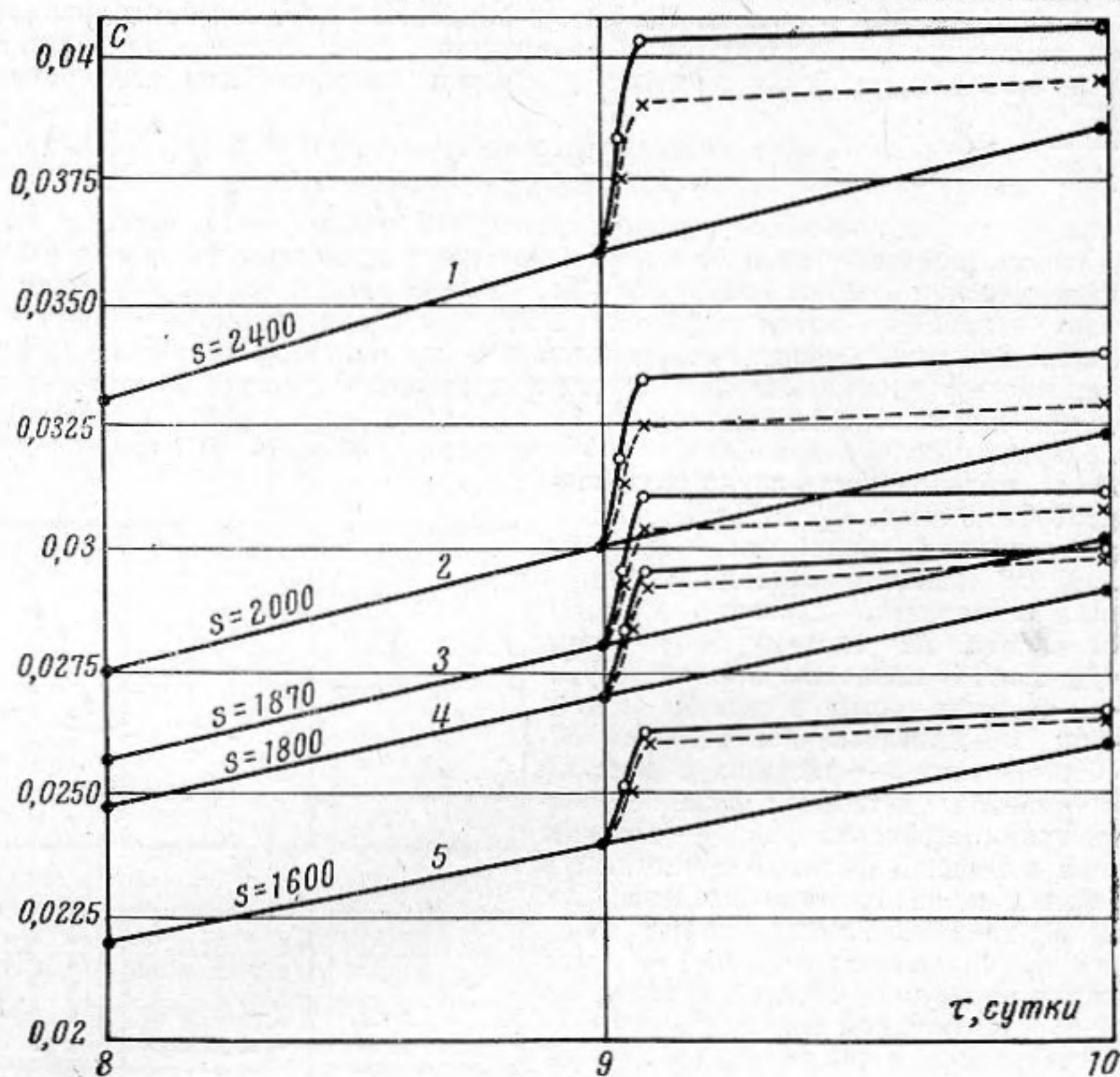
Установленная зависимость скорости диффузии от площади сечения сосуда s позволила исследовать характер влияния твердых частиц на систему гель — жидкость. На фиг. 3 показаны варианты размещения твердых частиц в системе гель — жидкость: 1 — исходный контрольный образец без частиц, 2 — частицы в жидкой фазе, 3 — частицы в твердой фазе, 4 — частицы на границе раздела фаз, 5 — частицы в твердой и жидкой фазах, 6 — частицы в обеих фазах и на границе раздела фаз. В качестве твердых частиц брались стеклянные шарики диаметром 2 мм, которые равномерно заполняли объемы рабочих сосудов 2—6 (для жидкой фазы брались частицы с отверстием и нанизывались на капроновую нить диаметром 0,1 мм). Опыты показали, что в образцах 4, 6 (фиг. 3) диффузия протекала более медленно, чем в образцах 1, 2, 3, 5, показавших одинаковую скорость диффузии. Озвучивание вышеперечисленных образцов в течение 2 час спустя 9 суток после начала процесса показало одинаковое ускорение диффузии в образцах 1, 2, 3, 5, которое было больше ускорения диффузии в образцах 4, 6 (как и для незвученных образцов). Уменьшение потока диффузии (одинаковое по величине) для образцов 4, 6 объяснялось уменьшением площади раздела фаз s благодаря наличию твердых частиц.

Был проведен также следующий опыт: брались четыре партии сосудов диаметром около 50 мм ($s = 2000$ мм²) с системой гель — жидкость (фиг. 1) и на границу раздела фаз в равном количестве по 500 штук насыпались сферические частицы диаметром 2 мм из стеклопластика ($d = 1,1$ г/см³), стекла ($d = 2,6$ г/см³) и свинца ($d = 11,4$ г/см³). Полученные кинетические кривые диффузии, построенные в координатах концентрации красителя в гр/100 гр воды (C) и времени в сутках, показаны на фиг. 4 (черные кружочки и сплошная линия): 2 — частиц нет, 3 — частицы из стеклопластика, 4 — из стекла, 5 — из свинца. Частицы давили на гель и уменьшали площадь раздела фаз с 2000 мм² (фиг. 4, кинетическая кривая 2) до 1870 мм² — кривая 3 (стеклопластик), 1800 мм² кривая 4 (стекло), 1600 мм² кривая 5 (свинец). Данные опыта показали, что чем тяжелее частицы, тем плотнее они прижимались к твердой фазе и тем меньше была площадь раздела фаз. На фиг. 4 представлены кинетические кривые диффузии для восьми различных условий опыта: кривые 1 ($s_1 = 2400$ мм²) и 2 ($s_2 = 2000$ мм²) показывают, что ускорение диффузии при озвучивании (в течение 2 час) пропорционально отношению $s_1 : s_2$ (кривые показаны крестиками и пунктирной линией); кривая 3 показывает, что частицы из стеклопла-



Фиг. 3

тика уменьшили s с 2000 до 1870 мм^2 , и что под воздействием ультразвука (в течение 2 час) в сосуде с $s = 1870 \text{ мм}^2$ происходило ускорение диффузии (показано крестиками и пунктирной линией), которое по величине было меньше ускорения диффузии в сосуде с $s = 2000 \text{ мм}^2$ при наличии частиц из стеклопластика (показано светлыми кружочками и сплошной линией); кривая 4 — при озвучивании в течение 2 час в сосуде с $s = 1800 \text{ мм}^2$ происходило ускорение диффузии (крестики и пунктирная линия) меньшее по величине ускорения диффузии в сосуде с $s = 2000 \text{ мм}^2$ при наличии частиц из стекла (светлые кружочки и сплошная линия); кривая 5 — при озвучивании в течение 2 час, в сосуде с $s = 1600 \text{ мм}^2$ происходило ускорение диффузии



Фиг. 4

(крестики и пунктирная линия) меньшее по величине ускорения диффузии в сосуде с $s = 2000 \text{ мм}^2$ при наличии частиц из свинца (светлые кружочки и сплошная линия).

Сравнение кривых 3, 4 и 5 показывает, что под влиянием ультразвука происходит смещение твердых частиц, приводящее к увеличению границы раздела фаз s , смещение твердых частиц тем больше, чем меньше их вес.

Полученные результаты показали, что для ускорения диффузии необходимо брать твердые частицы, имеющие удельную плотность одинаковую с удельной плотностью рабочей жидкости, и приводить указанные частицы во взвешенное состояние с помощью механической мешалки. При этом мощность мешалки должна быть минимально малой, чтобы обеспечить отрыв твердых частиц от границы раздела фаз без разрушения геля, наблюдающееся обычно в виде помутнения раствора. Для опытов брались сосуды с $s_1 = 2400$ и $s_2 = 2000 \text{ мм}^2$ с системой гель — жидкость (фиг. 1) и частицы из стеклопластика ($d = 1,1 \text{ г/см}^3$), приводимые во взвешенное состояние путем перемешивания. В результате озвучивания в течение 2 час (режим озвучивания: $f = 10 \text{ кгц}$, $I = 0,5 \text{ вт/см}^2$, $t = 5^\circ$) произошло ускорение диффузии (фиг. 4, кривые 1 и 2, показано светлыми кружочками и сплошной линией), которое было пропорционально s_1 и s_2 и превышало по величине ускорение диффузии в таких же сосудах без твердых частиц (показано крестиками и пунктирной линией). Следовательно, наибольшее ускорение диффузии в системе гель — жидкость при воздействии ультразвуком получается при наличии частиц, находящихся в жидкости во взвешенном состоянии.

Возможность использования твердых частиц для ускорения диффузии при механическом перемешивании проверялась в опытах по крашению образцов шубной овчи-

ны в кислотном черном красителе С и прямом коричневом красителе ЗСХ при температуре 30°. Твердые частицы готовились из эпоксидной смолы с наполнителем: на 100 вес. ч. смолы ЭД-5 или Э1200 бралось 10 вес. ч. сухого цемента и 10 в. ч. полиэтиленполиамина. После перемешивания масса продавливалась через отверстия диаметром 2,5 и 5 мм, а после просушивания нити разрезались на части с целью получения шариков диаметром 2,5 и 5 мм: для обработки ультразвуком — 2,5 мм, для мешалки — 5 мм. Перемешивание осуществлялось мешалкой при скорости вращения 300 об/мин. Изменяя время крашения, мы стремились получить одинаковый результат прокраса. Качество прокраса определялось по коэффициенту отражения β [9]. В таблице представлены результаты исследований крашения образцов овчины при $t = 30^\circ$ и концентрации рабочего раствора 0,1%.

Прямой коричневый краситель ЗСХ	
Диффузия, 6 час	$\beta = 6,1\%$
Перемешивание мешалкой при 300 об/мин, 5 час	$\beta = 6,2\%$
Перемешивание при 300 об/мин и наличие частиц, 3 час	$\beta = 6\%$
Воздействие ультразвука, 2 час	$\beta = 6\%$
Воздействие ультразвука с частицами, 40 мин	$\beta = 6\%$
Кислотный черный С	
Диффузия, 5 час	$\beta = 2,3\%$
Перемешивание мешалкой при 300 об/мин, 4 час	» »
Перемешивание при 300 об/мин и наличие частиц, 3 час	» »
Воздействие ультразвука, 2 час	» »
Воздействие ультразвука с частицами, 40 мин	» »

Из таблицы видно, что наибольшее ускорение диффузии под влиянием ультразвука и мешалки наблюдается при наличии мелких твердых частиц (время обработки сокращается в 2—3 раза).

Для объяснения полученных результатов воспользуемся результатами исследований влияния ультразвука на поверхность металлоизделий [1]. Предположим, что подобно твердому телу в гелях и жидкостях под влиянием кавитации возникают зоны сжатия, которые в жидкости существуют в течение времени соизмеримого со временем кавитационного взрыва; в гелях они должны наблюдаться визуально. Локализация напряжений в зонах сжатия приводит к уменьшению энергии активации диффузии, что вызывает повышение скорости диффузии: относительно большие молекулы перемещаются в растянутые зоны, а малые молекулы — в сжатые. Кратковременность существования этих зон объясняет факт незначительной эффективности акустической диффузии в жидкости [4]. С целью проверки возможного изменения объема геля при озвучивании был поставлен следующий опыт: в стеклянной колбе с плоским дном емкостью 125 см³ была получена система гель — жидкость (80 см³ — геля, 45 см³ — воды), на границе фаз находился слой мелких твердых частиц. Колба была закрыта пробкой, через которую проходила стеклянная трубка с внутренним диаметром 4 мм. За изменением объема геля следили по уровню жидкости в трубке. При озвучивании объем геля увеличивался за счет нагрева и под влиянием наклепа границы фаз с помощью твердых частиц. Путем последовательного охлаждения всей системы увеличение объема геля вследствие нагрева исключалось и определялось увеличением объема геля из-за пластической деформации, которое исчезало спустя 5—6 час после озвучивания. При озвучивании той же системы без твердых частиц увеличения объема геля не наблюдалось. Эти опыты являются подтверждением предположения о возможном существовании зон сжатия, возникающих под влиянием ультразвука. По мере перехода вещества от жидкого состояния к твердому характер механизма воздействия ультразвука изменяется: динамическое изменение поверхности раздела фаз и других параметров (плотности, температуры и т. п.) заменяется устойчивыми изменениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Г. Белов. Влияние ультразвука на физико-механические свойства металла. Ультразвук. техн., 1966, 1, 27—31; ав. св. № 178 847, бюллетень № 4, 1966; ав. св. № 226 328, бюллетень № 28, 1968.
2. Б. Г. Белов. Сб. «Применение ультраакустики к исслед. вещества». М., МОПИ, 1961, 14, 309—322.
3. В. М. Фридман. Физико-химическое действие ультразвука на гетерогенные процессы. Ультразвук. техн., 1967, 6.
4. Т. В. Макарова, А. В. Кортнев. К вопросу о воздействии акустических колебаний на диффузионные процессы в жидкой среде. Ультразвук. техн., 1966, 2, 45—49.
5. М. Е. Архангельский. Об ускорении процесса диффузии ультразвуком. Ультразвук. техн., 1967, 3.

Москва

Поступило в редакцию
6 мая 1968 г.