

А.М. Гинстинг · А.А. Барым

Ультразвук

В ПРОЦЕССАХ
ХИМИЧЕСКОЙ
ТЕХНОЛОГИИ

ГОСХИМИЗДАТ · 1960

А. М. ГИНСТЛИНГ • А. А. БА

УЛЬТРАЗВУК В ПРОЦЕССАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХИМИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Ленинград-1960

В книге рассматриваются основные проблемы и результаты применения ультразвука в процессах химической технологии.

Предназначается для научных и инженерно-технических работников химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, целлюлозно-бумажной, текстильной и других отраслей промышленности, а также для студентов вузов соответствующих специальностей.

АРКАДИЙ МИХАЙЛОВИЧ ГИНСТЛИНГ
АРКАДИЙ АЗАРЬЕВИЧ БАРАМ

Ультразвук в процессах химической технологии

Редактор *В. А. Коц*

Техн. редактор *Т. А. Фомкина*
Корректор *К. А. Ланская*

Подписано к печати 15/IV 1960 г.
М-30811

Печ. л. 6

Тираж 10 000

Формат бумаги 60×92¹/₁₆

Уч.-изд. л. 5,93

Заказ № 1138

Цена 3 руб.

ГОСХИМИЗДАТ, Ленинградское отделение, Ленинград, Невский пр., 28

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Глава I. Физические основы воздействия ультразвуковых колебаний на среду	
Общие положения	8
Параметры акустического поля бегущих волн	9
Стоячие звуковые волны	11
Эффекты второго порядка	11
Ультразвуковая кавитация	15
Прохождение звука через границу раздела сред	17
Термическое действие ультразвука	19
Измерение интенсивности ультразвука	21
Глава II. Современные методы получения акустических колебаний	
Общие положения	25
Аэродинамические преобразователи	27
Гидродинамические преобразователи	29
Пьезоэлектрические преобразователи	32
Магнитострикционные преобразователи	38
Электромагнитные преобразователи и некоторые новые способы получения акустических колебаний	43
Глава III. Ультразвук в механических и гидромеханических процессах химической технологии	
Коагуляция аэрозолей	48
Получение аэрозолей	51
Разделение газовых смесей	51
Разделение жидких неоднородных систем	52
Перемешивание и гомогенизация	56
Процессы в псевдооживленном слое	60
Деструкция высокополимеров	61
Глава IV. Ультразвук в процессах тепло- и массообмена	
Теплообмен	67
Массообмен	72
Кристаллизация и растворение	73
Экстракция, сорбция, перегонка, сушка	74
Глава V. Выбор условий процесса и параметров аппарата	81
Закключение	90
Литература	92

ПРЕДИСЛОВИЕ

Значение ультразвука, как мощного фактора интенсификации технологических процессов, в настоящее время общеизвестно. Однако литература, относящаяся к применению ультразвука в такой важной отрасли техники, как химическая технология, далеко не достаточна.

Настоящая работа представляет собой попытку краткого освещения основных проблем применения ультразвука в процессах химической технологии. По своему характеру и объему, а также вследствие относительной новизны затрагиваемых вопросов она не может, естественно, претендовать на исчерпывающее их рассмотрение.

В книге обобщены лишь важнейшие сведения по теории, результаты экспериментальных исследований и промышленного применения ультразвука. При этом, наряду с трудами отечественных и зарубежных исследователей, использованы некоторые соображения, расчеты и экспериментальные данные авторов, частично опубликованные в периодической литературе.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Применение звуковых и ультразвуковых колебаний занимает, как известно, видное место среди новых методов исследования свойств веществ и воздействия на различные физические и химические процессы, используемые в промышленности. Эффективность ультразвуковых методов контроля и интенсификации технологических процессов столь велика, а пределы применения этих методов столь широки, что каждый год работы в области ультразвука¹ раскрывает все более и более значительные перспективы его промышленного использования.

Использование упругих механических колебаний, в частности в химической технологии, является весьма перспективным: во многих случаях оно обеспечивает исключительно высокую интенсивность технологического процесса, не достижимую с помощью таких широко распространенных методов, как механическое перемешивание, применение высоких температур и давлений и т. п. Поэтому проблема применения ультразвука в процессах химической технологии заслуживает серьезного внимания.

Применение ультразвуковых колебаний в химической технике развивается в двух основных направлениях: а) контроль технологических процессов и качества продукции и б) интенсификация производства.

Настоящая книга посвящена ультразвуковым методам интенсификации процессов химической технологии (ультразвуковые методы контроля, имеющие большое значение для химической промышленности, заслуживают отдельного рассмотрения).

Эти методы относятся к самым молодым и наиболее быстро развивающимся в современной технике. Началом работ в этой области можно считать двадцатые годы нашего столетия, когда

¹ Известно, что существенного физического различия между звуковыми колебаниями слышимого диапазона частот и ультразвуковыми колебаниями (а иногда и существенной разницы в эффективности их действия) не имеется; поэтому обычно принято не разделять также технику получения и методы применения звуковых и ультразвуковых колебаний.

Р. Вудом [1] была показана возможность ультразвуковой интенсификации ряда физико-химических процессов. В настоящее время трудно назвать область химической технологии, в которой бы не находил применения ультразвук.

Раньше полагали, что для интенсификации технологических процессов необходимы колебания высоких частот (не менее 300—500 кГц). Однако исследования последних лет показали, что упругие колебания достаточно большой амплитуды звукового или сравнительно низкого ультразвукового диапазона частот в ряде случаев не менее эффективны.

В первых опытах применения ультразвука для ускорения физико-химических явлений стремились использовать высокоинтенсивные колебания. В последнее время для этой цели успешно применяют акустические колебания как средней (от долей вт/см^2 до нескольких вт/см^2), так и большой (10 вт/см^2 и выше) интенсивности [2].

Таким образом, современная техника практически использует упругие механические колебания весьма широкого диапазона частот и интенсивностей.

Правильный выбор параметров акустического поля (и соответственно преобразователя, генерирующего акустические колебания) с целью эффективного воздействия на технологический процесс представляет важную, но далеко не простую задачу.

Известно, что механизм гидродинамических, тепловых и диффузионных процессов химической технологии отличается большой сложностью. Во многих случаях осуществляемый в аппарате процесс представляет собой совокупность ряда физических и химических «элементарных» процессов или стадий, направление и интенсивность протекания которых по-разному зависят от внешних условий. Кинетика процесса определяется закономерностями протекания его лимитирующей стадии или лимитирующих стадий, которые могут быть различными для разных процессов и в разных условиях.

Сознательное изменение скорости процесса, в частности путем воздействия на него упругих колебаний, требует понимания механизма и кинетики этого процесса. Объектом воздействия должна быть прежде всего лимитирующая стадия процесса. Естественно, что для эффективного воздействия на нее необходимо располагать сведениями о зависимости направления и скорости этой стадии от параметров акустического поля. Поэтому, наряду с исследованием влияния ультразвука на разного рода сложные технологические процессы, необходимо глубокое изучение его влияния на «элементарные» явления, составляющие эти процессы.

Параметры акустического поля, создаваемого тем или иным способом, определяются типом преобразователя, мощностью и режимом его работы, а также зависят от формы и размеров поля, состава и свойств облучаемой среды и условий процесса

(температуры, давления и др.). Все эти параметры связаны между собой определенными закономерностями, в большинстве случаев выраженными в настоящее время математически.

Эффективное воздействие упругих колебаний на технологический процесс обеспечивается правильным выбором не только излучателя, но также и соотношений между производительностью установки, параметрами акустического поля и параметрами аппарата. При этом специалисты сталкиваются с широким комплексом разнообразных физических, физико-химических и технических вопросов, от правильного решения которых зависят интенсивность и результаты процесса. Некоторые из этих вопросов еще недостаточно изучены; сведения по другим вопросам разбросаны в специальной литературе.

Ниже будут рассмотрены теоретические основы и практические пути решения указанных вопросов, а также результаты применения ультразвука в процессах химической технологии, достигнутые в настоящее время.

Глава I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СРЕДУ

Общие положения

Эффективность воздействия ультразвука на вещество и на различные физико-химические процессы обусловлена природой акустических колебаний. Распространение этих колебаний представляет собой волновой процесс. Его скорость, точнее скорость распространения состояний озвучиваемой среды:

$$c = \lambda f \text{ см/сек}$$

где f — частота колебаний, 1/сек.;

λ — длина волны, см.

При одинаковой частоте колебаний скорость звука в разных средах различна; она связана с химическим строением озвучиваемой среды [3, 4], что, между прочим, может быть использовано при изучении кинетики химических реакций [5, 6].

По диапазону частот акустические колебания делятся на инфразвуковые ($0-20$ гц), звуковые ($20-2 \cdot 10^4$ гц), ультразвуковые ($2 \cdot 10^4-10^8$ гц) и гиперзвуковые ($> 10^8$ гц). Теория ультразвуковых колебаний составляет, таким образом, один из разделов акустики.

Ниже рассматриваются основные параметры акустического поля бегущих и стоячих волн для простейшего вида волнового движения — плоских волн, характеризующихся наличием плоского фронта. Если колеблющаяся система велика по сравнению с длиной волны, то в ней распространяются так называемые бегущие волны; в противном случае бегущие волны в результате отражения от граничных поверхностей системы «накладываются» и превращаются в стоячие.

Помимо частоты и амплитуды колебаний, на интенсивность звуковых и звукохимических процессов¹ оказывают существен-

¹ Под «звуковыми», в отличие от «звукохимических», здесь понимаются процессы, проводимые в поле акустических колебаний, не влияющем заметно на направление и скорость собственно химических превращений в озвучиваемой среде.

ное влияние и другие параметры акустического поля (ускорение частиц среды, интенсивность звуковых колебаний, переменное звуковое давление и др.).

На указанных процессах сказываются также эффекты второго порядка, ощутимые при интенсивных акустических колебаниях (звуковой ветер, радиационное давление и др.), и ультразвуковая кавитация.

Параметры акустического поля бегущих волн

При распространении упругих колебаний по законам линейной акустики передача энергии не связана с переносом вещества; при этом энергия периодически переходит из потенциальной в кинетическую и обратно. Полная средняя энергия в единице объема (плотность энергии звуковой волны) $\bar{E}$ пропорциональна плотности среды ρ , квадрату амплитуды колебаний A и квадрату частоты f :

$$\bar{E} = \bar{E}_{\text{кин}} + \bar{E}_{\text{пот}} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho U^2 \text{ эрг/см}^3 \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, 1/сек.;

$U = \omega A$ — амплитуда колебательной скорости, см/сек.

Акустическое поле бегущих волн принято характеризовать интенсивностью (или силой) звука, т. е. количеством энергии, переносимой звуковой волной за 1 сек. через площадку в 1 см², перпендикулярную к направлению движения волны. Для плоской волны, в которой форма и площадь поверхности волнового фронта не изменяются, сила звука равна энергии, заключенной в параллелепипеде высотой, равной скорости звука, и площадью основания, равной единице:

$$I = \bar{E}c \text{ вт/см}^2 \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) легко получить:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} 10^7 \text{ см} \quad (3)$$

$$U = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} 10^7 \text{ см/сек} \quad (4)$$

и

$$B = U\omega = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} 10^7 \text{ см/сек}^2 \quad (5)$$

где B — амплитуда ускорения.

Уравнения (1) — (5) позволяют количественно охарактеризовать звуковую энергию и установить зависимость ее параметров A , B и U от частоты колебаний (при определенной силе звука), что существенно для понимания влияния ультразвука на

разнообразные физико-химические процессы, имеющие техническое значение.

Ясно, например, что при $I = \text{const}$ амплитуда колебательной скорости U и соответственно колебательная скорость частиц среды не зависят от частоты f , амплитуда колебаний A обратно пропорциональна f , а амплитуда ускорения B и соответственно ускорение частиц среды возрастают с увеличением f (рис. 1).

Выражая ускорение B через ω и A

$$B = \omega^2 A = 4\pi^2 f^2 A \quad (6)$$

легко видеть, что при $A = \text{const}^1$ оно пропорционально квадрату частоты. Это приводит при высоких частотах к огромным значениям ускорений частиц, в 10^5 — 10^6 раз превосходящим ускорение силы тяжести, несмотря на очень небольшую амплитуду колебаний. Такие большие ускорения способствуют разрыву частиц среды и оказывают существенное влияние на процессы эмульгирования, диспергирования, растворения и т. п.

Звуковая волна характеризуется также переменным звуковым давлением, амплитуда которого

$$P = \omega \rho c A = \rho c U \quad (7)$$

может быть выражена в атмосферах ($1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 981 \cdot 10^3 \text{ дн/см}^2$) или в барах ($1 \text{ бар} = 1 \text{ дн/см}^2$).

С учетом уравнения (3) выражение (7) можно привести к следующему виду:

$$P = \sqrt{2\rho c I \cdot 10^7} \text{ дн/см}^2 = \frac{1}{981} \sqrt{20\rho c I} \text{ ат} \quad (8)$$

Отсюда следует, что при заданной силе звука величина давления P не зависит от частоты.

Для расчета интенсивности ультразвука по значению звукового давления можно пользоваться формулой:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{PU}{2} \quad (9)$$

При интенсивных колебаниях в жидкой среде мгновенное значение давления в звуковой волне меняется от нескольких

¹ Практически амплитуда несколько уменьшается с повышением частоты ультразвуковых колебаний.

атмосфер или даже десятков атмосфер (например, в плоской ультразвуковой волне в воде $P=1,7$ ат при интенсивности $I=1$ вт/см² и $P=51$ ат при $I=1000$ вт/см²) до такого же разрежения («отрицательного давления»).

Стоячие звуковые волны

Уравнения (2)—(8), характеризующие зависимость A , B , U , P от определяющих их параметров, относятся к бегущей волне. При осуществлении же процессов химической технологии в акустическом поле нередко, вследствие ограниченных размеров резервуара, возникает явление отражения упругих колебаний по направлению к излучателю, т. е. образуется поле стоячих волн.

При нормальном падении звука на плоскую границу раздела двух сред, обладающих разными акустическими сопротивлениями, возникает стоячая волна (колебание, образованное двумя волнами, бегущими навстречу друг другу). На расстояниях $\lambda/2$ в стоячей волне располагаются точки, в которых колебания отсутствуют (узлы); посередине между узлами располагаются точки с максимальной амплитудой (пучности). В поле стоячих волн значения A , B , U , P при полном отражении вдвое превосходят эти значения в исходных бегущих волнах. Узлы и пучности колебательной скорости располагаются в тех же точках, что узлы и пучности смещения. Распределение звукового давления в стоячей волне также характеризуется наличием узлов и пучностей, однако положение узлов давления совпадает с положением пучностей смещения. Таким образом, узлы и пучности скорости и смещения отстоят от узлов и пучностей давления на $\lambda/4$.

При образовании стоячих волн следует различать условия отражения от жесткой и податливой поверхностей. В случае абсолютно жесткой поверхности фазы смещения и скорости меняются скачком на 180° , так как амплитуда A и скорость U у поверхности равны нулю, тогда как в случае абсолютно податливой поверхности (в воде на границе вода—воздух) на 180° меняется фаза звукового давления. Таким образом, если у жесткой стенки всегда имеются узел смещения и пучность давления, то у податливой стенки образуются пучность смещения и узел давления. В общем случае, при отражении от поверхности, которую нельзя отнести ни к абсолютно жесткой, ни к абсолютно податливой, часть звуковой энергии переходит во вторую среду; поэтому в исходной среде имеет место сочетание стоячей и бегущей волн.

Эффекты второго порядка

Существенно, что в случае средней, а тем более большой интенсивности ультразвука, с которой обычно приходится иметь дело при интенсификации процессов химической технологии,

теория распространения упругих колебаний уже не может базироваться на линейном волновом уравнении. При этих интенсивностях возникают искажения формы ультразвуковой волны в процессе ее распространения (участки сжатия среды опережают участки разрежения), радиационное давление и акустические потоки (звуковой ветер).

Элементы теории нелинейной акустики и опытные данные по влиянию указанных явлений на различные физико-химические процессы рассмотрены в ряде работ [2, 7—13 и др.].

Звуковой ветер является гидродинамическим эффектом второго порядка, связанным с вязкостью среды, в которой распространяется звук. Появление постоянных потоков у излучателей, работающих на высоких частотах, связано как с поглощением упругих волн средой, так и с «насосным» действием поверхности колеблющегося излучателя: при движении вперед поверхность вибратора отталкивает среду, а при движении назад не полностью ее увлекает. Таким образом, степень сжатия и разрежения среды перед колеблющейся на высокой частоте поверхностью оказывается неодинаковой. Перед излучателем при этом образуется область разрежения, куда притекают новые частицы, которые также вовлекаются в колебание, и т. д.

Непосредственно у излучателя потоки не успевают развиваться и нарастают лишь на некотором расстоянии от вибратора, после чего стабилизируются; интенсивность этих потоков вновь существенно уменьшается при достаточном удалении от источника звука, а также при изоляции вибратора от реакционной зоны. В импульсном режиме при редкой частоте посылок и коротком импульсе звуковой ветер не успевает образоваться. При достаточной интенсивности акустических колебаний звуковой ветер проявляется в виде сильных течений, вызывающих интенсивное перемешивание жидкостей.

Давление излучения складывается из давления, развиваемого звуковой волной у препятствия, эффекта взаимодействия между акустическим полем и невозмущенной средой и связанного с этим эффектом перехода вещества из области акустического поля в окружающую среду или обратно.

Существование давления излучения подтверждается рядом опытов. Так, при прохождении ультразвуковых волн через границу раздела двух несмешивающихся жидкостей, имеющих близкие между собой значения акустического сопротивления (вода и четыреххлористый углерод) или различные их значения (вода и анилин), возникает фонтан, обращенный, независимо от направления распространения звука, в сторону той жидкости, в которой скорость звука больше [14]. На рис. 2 показано направление фонтана в жидкости при прохождении ультразвуковых волн из четыреххлористого углерода ($c_{20^\circ} = 938$ м/сек) в воду ($c_{20^\circ} = 1484$ м/сек) и из анилина ($c_{20^\circ} = 1656$ м/сек) в воду.

Если перед полностью отражающим рефлектором образуется стоячая звуковая волна, то давление излучения у его поверхности S будет равно плотности энергии $\bar{E}$ вблизи рефлектора:

$$S = \bar{E} = \frac{2I}{c} \quad (10)$$

где I — сила звука в бегущей волне.¹

Давление излучения может быть измерено радиометром, впервые предложенным для этой цели В. Альтбергом [15].

В настоящее время существует ряд приборов для измерения давления излучения [16—18 и др.].

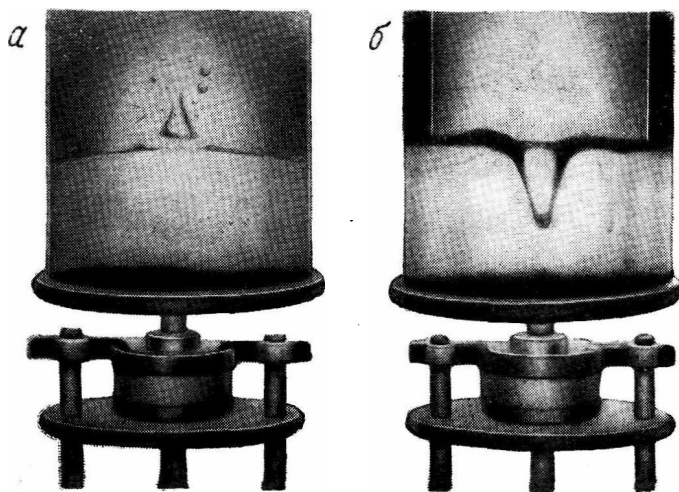


Рис. 2. Фонтан жидкости, обусловленный давлением излучения:

a — верхний слой вода, нижний — четыреххлористый углерод; b — верхний слой вода, нижний — анилин.

Радикационное давление и звуковой ветер играют существенную роль, в частности, в возникновении эффекта фонтанирования. Эффект фонтанирования жидкости при падении на ее свободную поверхность ультразвуковой волны от источника, находящегося в этой жидкости, был замечен еще в первых опытах Р. Вуда и А. Лумиса [1]. Впоследствии были установлены некоторые зависимости, характеризующие это явление. Известно, например, что высота фонтана растет с увеличением интенсивности ультразвука, что может быть использовано для качественного суждения о ней [19, 20]. В результате фонтанирования

¹ Понятие «интенсивность» (стр. 9) к стоячей волне, естественно, не применимо; поэтому при определении по формуле (10) радиационного давления у полностью отражающей поверхности используют значение интенсивности в бегущей волне.

образуются очень мелкие капельки жидкости, часть которых остается во взвешенном состоянии; это используется для получения аэрозолей.

Значения описанных выше параметров акустического поля могут быть определены расчетом.

Приводим пример такого расчета для акустического поля в воде ($c=1484$ м/сек) при частоте колебаний 300 кГц и интенсивности ультразвука 10 Вт/см².

1. Бегущие волны

Плотность звуковой энергии:

$$\bar{E} = \frac{I}{c} = \frac{10^8}{1,484 \cdot 10^5} = 674 \text{ эрг/см}^3 = 6,74 \cdot 10^{-5} \text{ вт} \cdot \text{сек/см}^3$$

Амплитуда переменного звукового давления:

$$P = \sqrt{2I\rho c} = \sqrt{2 \cdot 10^8 \cdot 1,484 \cdot 10^5} = 5,4 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2 = 5,4 \text{ ат}$$

В указанных условиях значение давления в звуковой волне меняется от сжатия ~ 5 ат до разрежения ~ 5 ат. Если учесть, что разность между минимальным и максимальным значениями давления ~ 10 ат возникает при этом на отрезке, равном половине длины волны, то градиент давления в направлении распространения колебаний составит ~ 40 ат/см.

Амплитуда колебаний частиц

$$A = \frac{U}{\omega} = \frac{U}{2\pi f} = \frac{36,7}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^5} = 1,99 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,199 \text{ мк}$$

т. е. по порядку величины приближается к размерам коллоидных частиц.

Амплитуда скорости частиц воды:

$$U = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^8}{1,484 \cdot 10^5}} = 36,7 \text{ см/сек}$$

Амплитуда ускорения частиц:

$$B = \omega U = 2\pi f U = 2\pi \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 36,7 = 6,9 \cdot 10^7 \text{ см/сек}^2$$

В рассматриваемом звуковом поле ускорения частиц среды в 10^5 раз превосходят ускорение силы тяжести и $2f$ раз в секунду меняют направление.

2. Стоячие волны

В стоячей звуковой волне значения P , A , U , B , приведенные в данном примере, при полном отражении удваиваются.

Давление излучения у полностью отражающей поверхности воды составляет:

$$S = \frac{2I}{c} = \frac{2 \cdot 10^8}{1,484 \cdot 10^5} = 1348 \text{ дин/см}^2$$

Ультразвуковая кавитация

Кавитация играет важную роль в звуковых и звукохимических процессах, протекающих в жидкой среде. С одной стороны, она может ограничить интенсивность распространяющихся в жидкости звуковых колебаний, с другой стороны, может оказать существенное влияние на скорость ряда физико-химических процессов.

Жидкие среды, легко выдерживающие значительные сжимающие усилия, при разрежении легко «разрываются» с образованием газовых полостей. Распространение акустических колебаний характеризуется чередующимся сжатием и разрежением среды вследствие перепада давления, достигающего при интенсивных колебаниях значительной величины (стр. 11, 14).

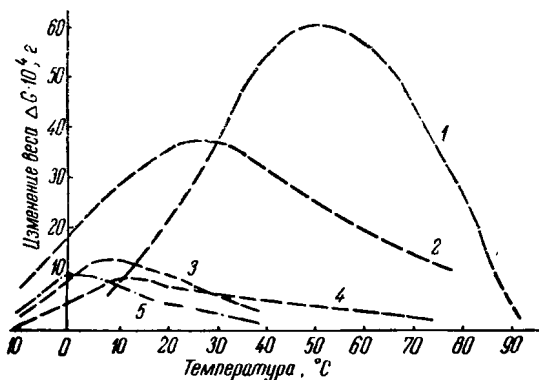


Рис. 3. Зависимость кавитационного разрушения (уменьшения веса) алюминиевых пластин от температуры среды:

1 — вода; 2 — керосин; 3 — бензин; 4 — спирт; 5 — ацетон.

Основными особенностями кавитации являются возникновение в жидкости и последующее «захлопывание» паро-газовых полостей, сопровождающееся значительными гидродинамическими ударами.

Кавитационная «прочность» жидкости связана с присутствием в ней газовых зародышей и примесей твердых веществ. Известно, что прочность жидкости возрастает при дегазации; качественные опыты показывают, что вода, подвергнутая давлению в 1000 ат, становится более прочной (точка кипения при этом повышается более чем на 100° [21, 22]). Эти и другие факты говорят о том, что причиной понижения прочности реальных жидкостей являются главным образом газосодержащие стабильные зародыши.

Предполагают [23], что достаточно малые пузырьки газа могут длительное время существовать в жидкости, не растворяясь,

за счет адсорбированного на их поверхности мономолекулярного слоя органических веществ.

В отличие от гидродинамической кавитации, возникающей в некоторых случаях в турбулентном потоке, зоны образования

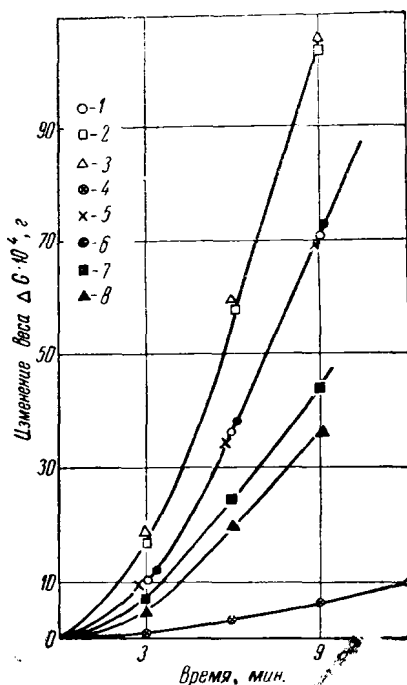


Рис. 4. Зависимость кавитационного разрушения (уменьшения веса) алюминиевых пластин в воде от содержания в ней газовой фазы:

1 — вода; 2, 3, 4 — барботаж азота, кислорода и углекислого газа со скоростью 130 л/час; 5 — барботаж азота (400 л/час); 6 — барботаж кислорода (400 л/час); 7 — барботаж азота (1000 л/час); 8 — барботаж кислорода (1000 л/час).

и интенсивность ультразвуковой кавитации можно в известных пределах регулировать. Явление ультразвуковой кавитации и ее влияние на физико-химические процессы в жидких телах рассмотрены в ряде работ [24—28]. Существует частотная зависимость эффективности ультразвуковой кавитации, причем более высокие частоты в этом отношении менее благоприятны [29]. Известно, что продолжительность жизни разных кавитационных пузырьков различна: одни из них захлопываются во время сжатия, другие, так называемые квазустойчивые пузырьки, могут существовать несколько сот периодов [30].

При определенных размерах пузырьки газа совершают резонансные колебания, частота которых определяется [31, 32] выражением:

$$f = \frac{1}{\pi d} \sqrt{\frac{3KP_0}{\rho}} \quad (11)$$

где d — диаметр пузырька, см;
 P_0 — гидростатическое давление в жидкости, дн/см²;

$K = \frac{c_p}{c_v}$ — отношение теплоемкостей газа в пузырьке при постоянном давлении и постоянном объеме;
 ρ — плотность жидкой среды, г/см³.

Для пузырьков воздуха в воде при $P_0 = 1 \text{ ат} = 1,02 \cdot 10^6 \text{ дн/см}^2$

$$K = 1,14, \quad \rho = 1 \text{ г/см}^3, \quad f = \frac{0,657}{d} \text{ кгц} \quad (12)$$

так что при частотах 10, 100 и 1000 кгц диаметры пузырьков воздуха в воде при резонансе равны соответственно 0,66, 0,066 и 0,0066 мм.