АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII 1971 Вып. 4

УДК 534.29;532.528

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ В ЖИДКОМ КИСЛОРОДЕ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

И. Н. Богачев, В. П. Коробейников

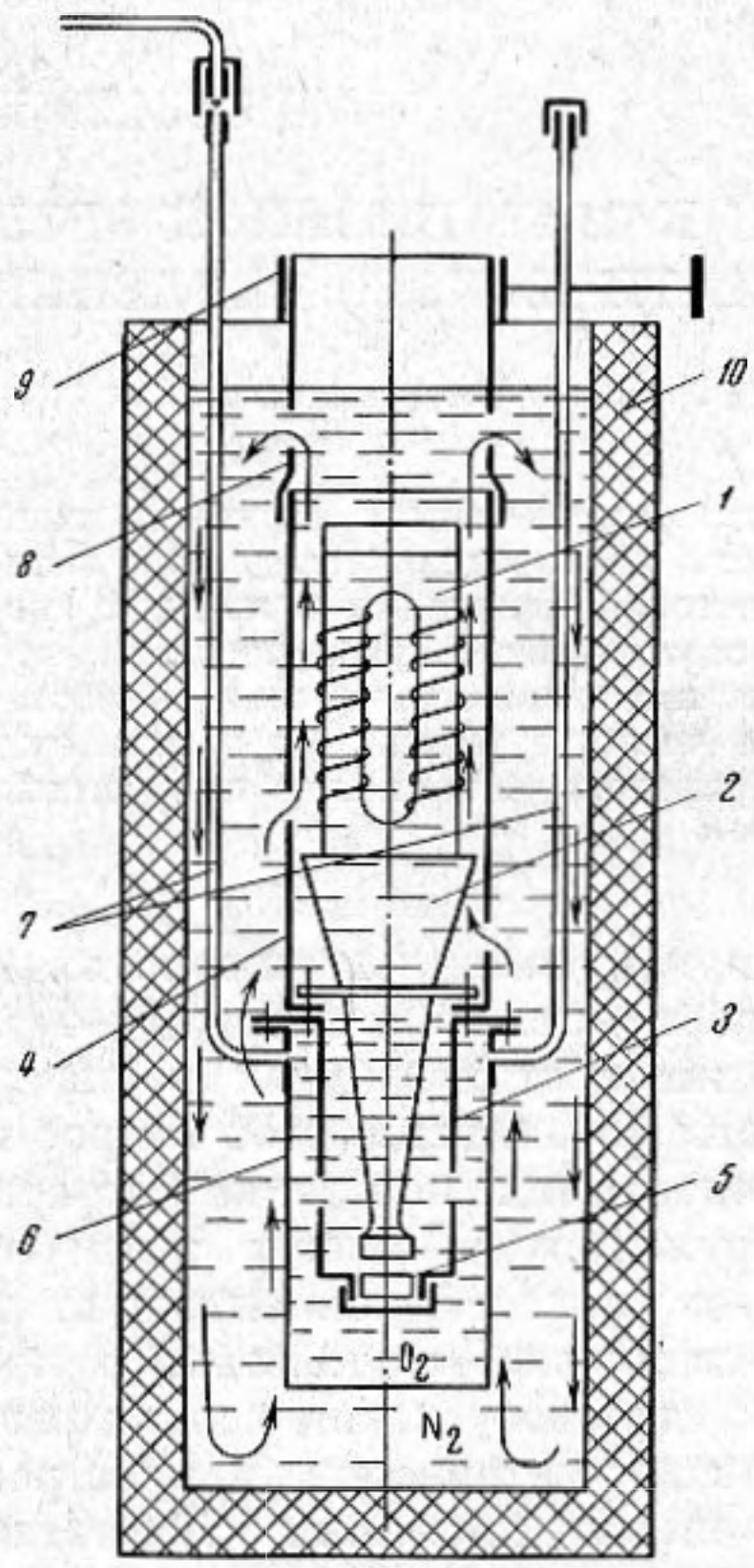
Описан метод и установка для экспериментального изучения кавитационной эрозии материалов в жидком кислороде. Исследована зависимость эрозионной активности акустической кавитации в жидком кислороде от статического давления и частоты ультразвука. Показано, что при увеличении статического давления интенсивность эрозии возрастает на несколько порядков; повышение частоты уменьшает эрозионную активность кавитационной области. Приведено объяснение полученных результатов.

Изучению акустической кавитации в криогенных жидкостях до настоящего времени посвящено мало работ (см., например, [1—4]), а по кавитационной эрозии в криогенных жидкостях данных в литературе практически нет, за исключением работы [5]. Однако этот вопрос приобретает все большее значение в исследованиях поведения поверхности твердого тела при микроударном нагружении и низких температурах. Кроме того, сочетание ударных нагрузок, высокой концентрации напряжений и низких температур при кавитационном воздействии в криогенных жидкостях реализует экстремально строгие условия испытания материалов на вязкость, т. е. на сопротивление материалов распространению трещин в условиях сложного напряженного состояния. Эффективность такого рода испытаний прямо зависит от интенсивности кавитации, возбуждаемой в криогенной жидкости. В ряде теоретических и экспериментальных исследований акустической кавитации [6—11] вскрыты основные физические причины, определяющие свойства кавитационной области, баланс энергии звукового поля при кавитации и эрозионную активность кавитации в жидкости, характеризуемую интенсивностью ударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков вблизи и на поверхности твердого тела, находящейся в кавитационной области.

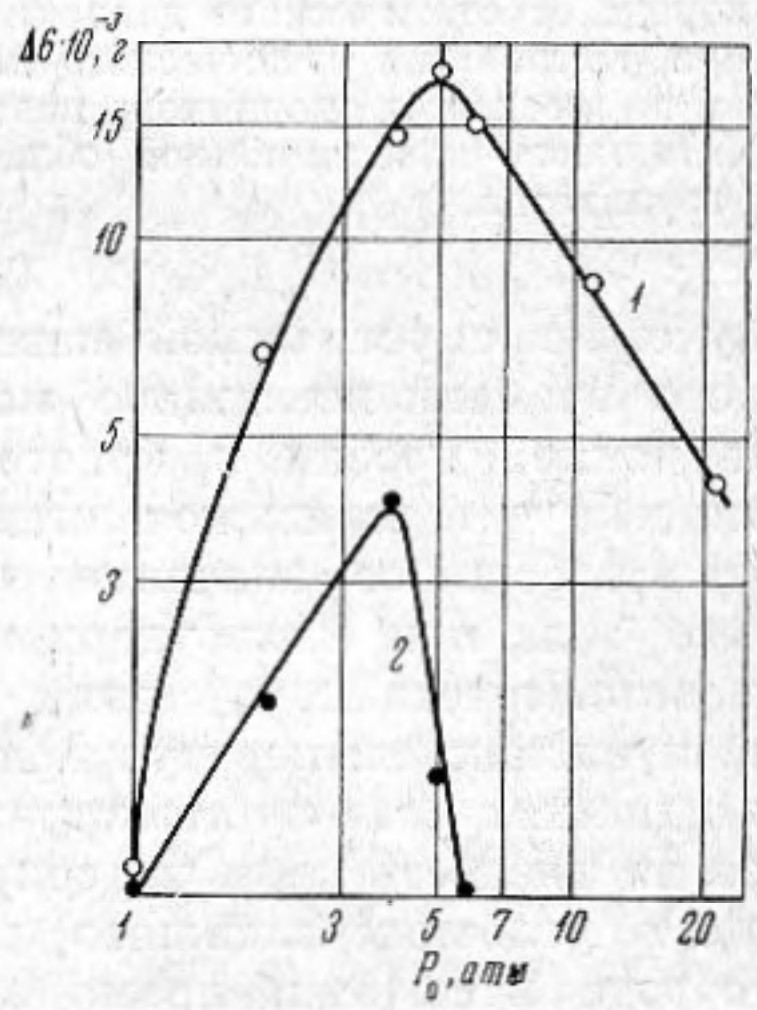
Подавляющее большинство работ по изучению влияния на кавитацию параметров звукового поля, внешних воздействий и свойств рабочей жидкости выполнено на «нормальных» жидкостях. Вместе с тем, криогенные жидкости по сравнению с нормальными имеют ряд особенностей; в первую очередь это относится к газосодержанию. Например, жидкий кислород, переохлажденный до температуры кипения азота при атмосферном давлении (77,2° K), является практически полностью дегазированной жидкостью.

В работе [7] давление в ударной волне, возникающее в момент захлопывания кавитационного пузырька, определяется по полуэмпирической формуле $p_m \simeq P_0 / 81\delta^3$, где P_0 — гидростатическое давление, δ — параметр газосодержания, характеризующий содержание парогазовой смеси в кавитационном пузырьке и в случае отсутствия газа в кавитирующей жидкости равный $\delta = P_п / P_0$, где $P_п$ — давление насыщенных паров, которое для каждой жидкости определяется только ее температурой. Таким обра-

зом, давление в пузырьке в момент захлопывания при заданном $P_п$ для дегазированной жидкости не зависит от амплитуды звукового давления $p_а$, полностью определяется величиной гидростатического давления и растет не только линейно с ростом P_0, но и вследствие уменьшения δ. В работе [11] подчеркивается, что наибольший эффект повышения интенсивности кавитации при увеличении избыточного статического давления в жидкости можно получить лишь при оптимальном соотношении между звуковым и статическим давлением, которое приблизительно равно $2 \div 2{,}5$. Однако, как на это указано в работе [8], величины P_0 и $p_а$ не являются независимыми, так как увеличение статического давления,



Фиг. 1



Фиг. 2

уменьшая как количество кавитационных пузырьков, так и объем каждого из них, приводит к увеличению эквивалентного акустического сопротивления среды в кавитационной области. Увеличение же акустического сопротивления кавитирующей жидкости при постоянной амплитуде колебаний излучающей поверхности приводит к повышению вводимой в кавитирующую жидкость акустической мощности и к повышению звукового давления $p_а$. Экспериментальная проверка данного положения путем определения величины кавитационной эрозии в отстоявшейся дистиллированной воде при температуре 23° в широком диапазоне значений P_0 дала следующую эмпирическую зависимость абсолютной величины кавитационной эрозии ΔG от статического и звукового давлений: $\Delta G \sim P_0 \cdot p_а^4$. Однако эта зависимость получена при упрощающем предположении, что звуковое давление $p_а$ пропорционально электрическому напряжению на излучателе и не зависит от статического давления P_0, хотя непосредственные измерения $p_а$ в кавитационной зоне показывают сложный характер зависимости звукового давления от напряжения на излучателе, значительно отличающейся от пропорциональной.

Наши опыты по определению зависимости интенсивности кавитационной эрозии от избыточного статического давления проводились с жидким

кислородом при температуре 77,2° К (температура кипения азота, который использовался в качестве хладоагента при атмосферном давлении). На фиг. 1 показана схема экспериментальной установки. Здесь *1* — пакетный магнитострикционный преобразователь, несущий обмотку возбуждения, которая одновременно является обмоткой подмагничивания; *2* — экспоненциальный волновод-концентратор с тонким фланцем, выполненным в узловой плоскости концентратора. К фланцу через фторопластовые прокладки крепятся держатель образца *3* и кожух преобразователя *4*. Металлический образец *5* в виде диска диаметром 18 и толщиной 6 *мм* помещается в гнезде держателя образца на фиксируемом расстоянии от излучающей поверхности волновода-концентратора. К фланцу держателя образца через фторопластовую прокладку присоединяется рабочая камера *6* с заливочными трубками *7*, оканчивающимися штуцерами. Фторопластовые прокладки в данной установке являются одновременно и уплотнениями и мягкими акустическими связями между волноводноизлучающей системой и пассивными элементами установки, так как фторопласт при низких температурах сохраняет достаточно высокую пластичность. Кожух преобразователя *4* соединен с текстолитовой втулкой *8*, которая, являясь теплоизолятором, в верхней части через кронштейн *9* крепится к штативу. Все перечисленные детали и узлы, кроме штатива с кронштейном, в процессе опыта представляют собой единый криостатируемый блок. Охлаждающим устройством является криостат *10*. Требуемое статическое давление в рабочей камере создается сжатым кислородом при помощи газового редуктора.

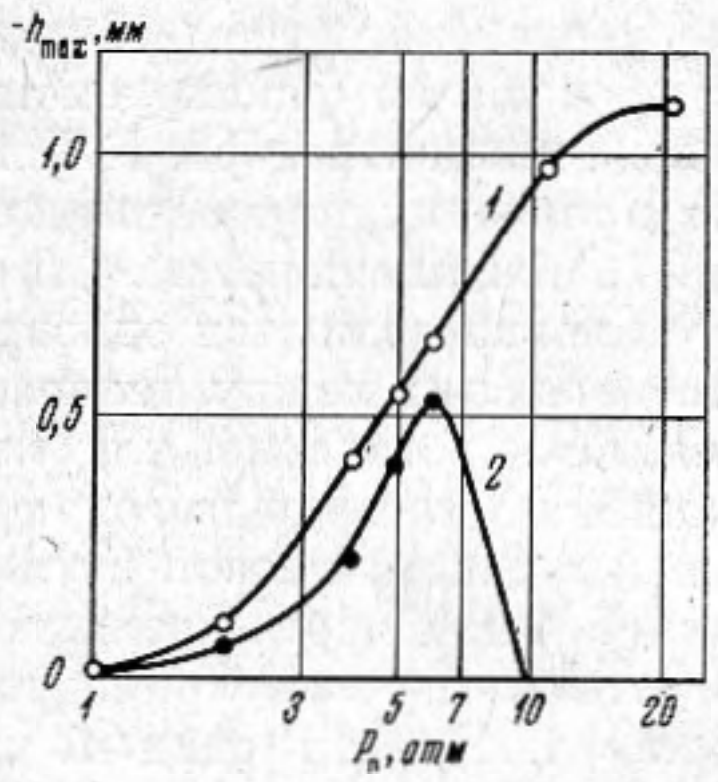
Использование магнитострикционных преобразователей малой мощности, т. е. небольших размеров в поперечном сечении, и относительно низких резонансных частот обусловливает вполне удовлетворительное охлаждение преобразователей жидким азотом. Конвективная циркуляция хладоагента в криостате (показанная стрелками на фиг. 1) повышает стабильность температурного режима тепловыделяющих элементов установки во время ее работы. Следует отметить также, что при низких температурах улучшаются акустические качества материалов волноводно-излучающей системы [12].

Исследования проводились на частотах 15 и 35 *кгц*, при этом в установке заменялись преобразователь с концентратором и держатель образца, так как длина последнего определяется длиной высокоамплитудной части концентратора. Осевой зазор между излучающей поверхностью концентратора и испытуемой поверхностью образца составлял 0,6 *мм*. Примененный способ установки образцов в отличие от присоединения образцов на резьбе непосредственно к концентратору улучшает температурное равновесие образца с омывающей его рабочей жидкостью и устраняет неизбежную деформацию образцов при их закреплении на излучающей поверхности концентратора и возможное отвинчивание во время озвучивания. Образцы изготовлялись из отожженного технически чистого алюминия, рабочая поверхность образцов полировалась обычными методами приготовления металлографических шлифов. Величина кавитационной эрозии оценивалась по убыли веса образца ΔG, полученной как разность в весе до и после воздействия ультразвуком. Время озвучивания образца составляло 10 *мин*. Кроме того, на рабочей поверхности образцов измерялись средние значения диаметра зоны разрушения и ее наибольшая глубина.

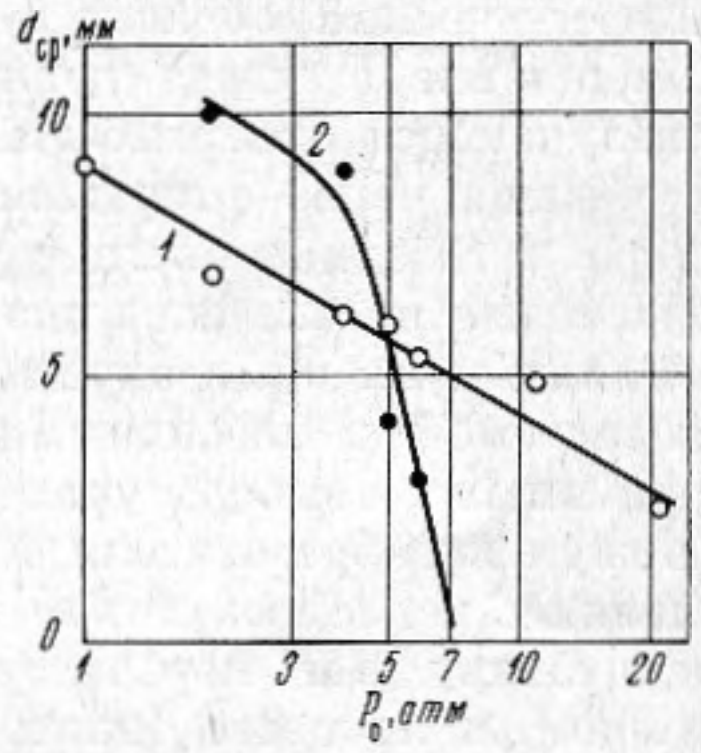
Электрическая мощность, подводимая к преобразователю, поддерживалась постоянной при каждой заданной частоте звукового поля и соответствовала измеренной на воздухе амплитуде смещения 65 *мкм* для частоты 15 *кгц* и 30 *мкм* для частоты 35 *кгц*.

На фиг. 2 показана полученная зависимость величины кавитационной эрозии от статического давления: кривая *1* — для частоты возбуждающего звукового поля 15 *кгц*, кривая *2* — для частоты 35 *кгц*. Каждая экспери-

ментальная точка — среднее значение 3—4 измерений с разбросом не более 10%. Видно, что обе кривые имеют ярко выраженный максимум, который при повышении частоты смещается в сторону меньших значений избыточного статического давления. Наличие максимума можно объяснить изменением величины звукового давления в кавитационной зоне при повышении P_0. Первоначальный рост P_0, по-видимому, в большей мере повышает плотность среды в кавитационной области при одновременном



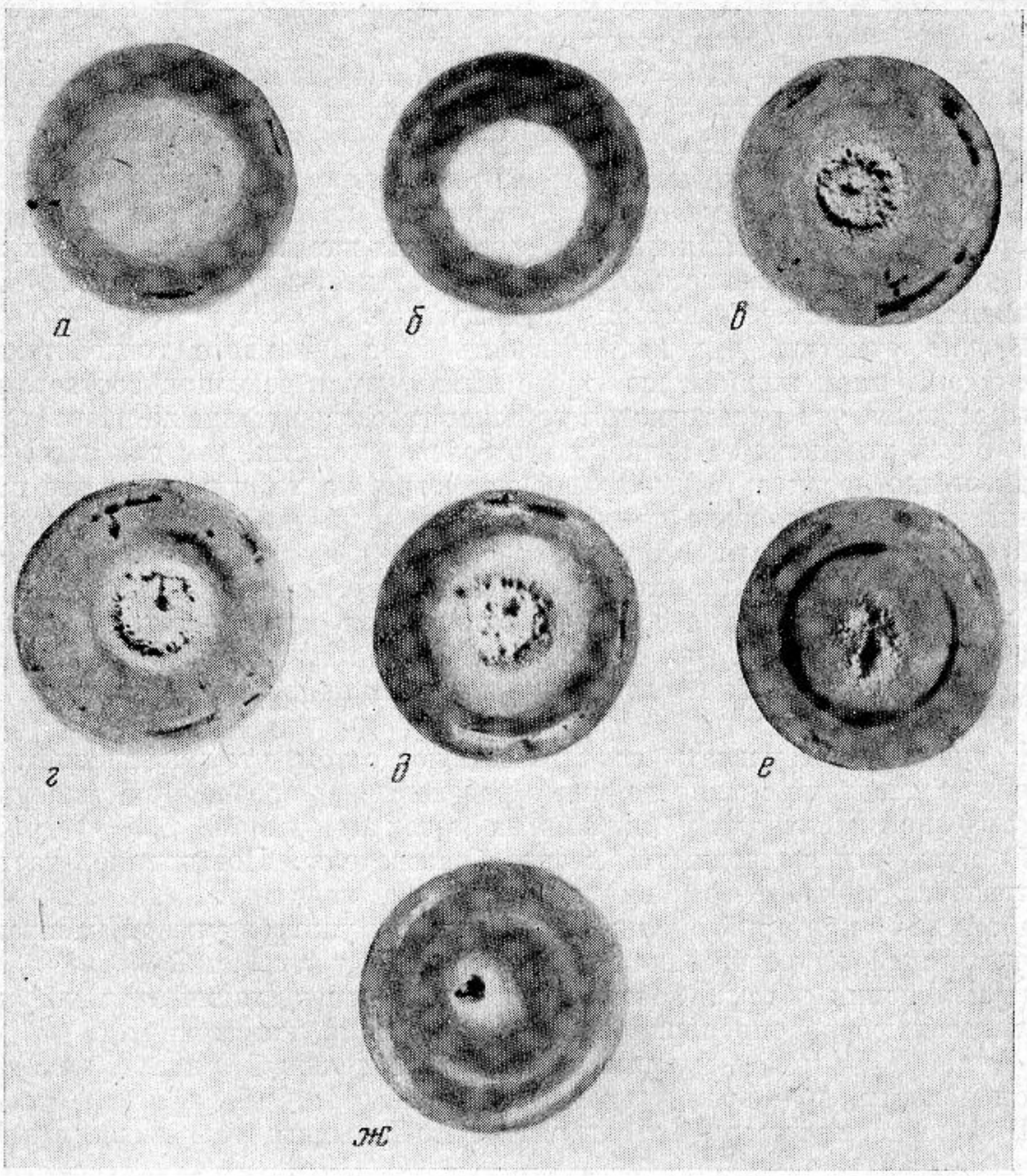
Фиг. 3



Фиг. 4

снижении ее сжимаемости, чем понижает амплитуду колебаний излучателя [13], что приводит к увеличению звукового давления и, следовательно, к росту максимального относительного радиуса кавитационных пузырьков R_{max} / R_{min}, где R_{max} и R_{min} — соответственно максимальный и минимальный радиусы кавитационной полости при расширении и сжатии. При дальнейшем повышении статического давления рост p_a и соответственно R_{max} / R_{min} приводит к увеличению времени захлопывания кавитационных пузырьков τ, которое в конечном счете становится больше половины периода ультразвука T. В этом случае отношение $2\tau / T$ начинает превышать единицу, и звуковое давление снова становится отрицательным, прежде чем кавитационные пузырьки полностью захлопнутся, в результате чего интенсивность кавитации уменьшается [9]. Увеличение частоты, т. е. уменьшение T обусловливает уменьшение того значения P_0, при котором $2\tau / T$ становится равным единице, и величина эрозии достигает наибольшего значения (кривая 2). По этой же причине на кривой *2* наблюдается и более резкое спадание после максимума. Различие в абсолютных значениях величины ΔG_{max}, вероятно, определяется как влиянием частоты, так и различием амплитуды колебаний излучателя для использованных частот. Оценить отдельно влияние каждого из этих факторов на величину ΔG в данном случае не представляется возможным. В описанных условиях опытов величина кавитационной эрозии ΔG не в полной мере характеризует интенсивность ударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков в кавитационной зоне, и не может служить мерой эрозионной активности кавитации с достаточной степенью точности. На фиг. 3 показана зависимость наибольшей глубины зоны разрушения на поверхности алюминиевых образцов, подвергнутых кавитационному воздействию, от статического давления. Глубина эрозионной зоны измерялась микронным индикатором при помощи стальной иглы с полусферой на конце радиусом 0,1 *мм*. Из представленных на фиг. 3 кривых (*1* — для частоты 15, *2*—35 *кгц*) видно, что при значениях P_0, при которых величина ΔG уже начинает уменьшаться, глубина эрозионной зоны еще увеличивается, достигая максимального значения при более высоких значениях статического давления, чем это наблюдается для весовых потерь. Так, если для частоты 15 *кгц* при амплитуде 65 *мкм* ΔG_{max} наблюдается

при $P_0 = 5$ *атм*, то наибольшая глубина эрозионной зоны, характеризующая уровень давления в ударных волнах, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков в кавитационной зоне, растет вплоть до значений $P_0 = 20$ *атм*, причем наибольшая глубина эрозионной зоны при $P_0 = 20$ *атм* возрастает более чем на два порядка по сравнению с таковой при атмосферном давлении. Следует отметить, что на характер кривых на фиг. 3, по-видимому, оказывает влияние и то обстоятельство, что



Фиг. 5

по мере удаления от поверхности излучателя снижается и интенсивность ультразвука и интенсивность создаваемой им кавитации, так как часть энергии ультразвука расходуется на образование кавитационных пузырьков [8]. Поэтому по мере увеличения глубины эрозионной зоны интенсивность кавитационного воздействия на эродируемую поверхность снижается.

Повышение статического давления резко изменяет размеры кавитационной области, что видно из фиг. 4, где показано изменение среднего диаметра зоны разрушения в зависимости от статического давления (*1*—15, *2*—35 *кгц*). Это явление может быть объяснено вторичными акустическими течениями и микропотоками, возникающими в зазоре между образцом и излучающей поверхностью волновода-концентратора за зоной

кавитации и сглаживающими пики растягивающих напряжений в кавитирующей жидкости [10]. С увеличением интенсивности кавитации, т. е. с увеличением потерь энергии, связанных с образованием и развитием кавитационной области, возрастает и интенсивность указанных акустических течений и микропотоков, что приводит к уменьшению кавитационной области и, следовательно, к уменьшению размеров эрозионной зоны.

На фиг. 5 показаны фотографии поверхности алюминиевых образцов, подвергнутых кавитационному воздействию в жидком кислороде при температуре 77° К и при частоте ультразвука 15 *кгц*: *а* — при атмосферном давлении, *б* — при статическом давлении $P_0 = 2$ *атм*, *в* — $P_0 = 4$ *атм*, *г* — $P_0 = 5$ *атм*, *д* — $P_0 = 6$ *атм*, *е* — $P_0 = 11$ *атм*, *ж* — $P_0 = 21$ *атм*. Представленная на фиг. 5 макрокартина эрозии поверхности алюминия отличается от таковой при кавитационном воздействии в воде [11] прежде всего отсутствием сильной экструзии материала по периферии эрозионной зоны и отдельных каверн, что указывает на изменения в механизме деформации и разрушения металла в условиях кавитации при низких температурах, хотя, как известно, обычная (статическая) пластичность алюминия при низких температурах увеличивается.

Нужно отметить, что интенсивность кавитационного воздействия в переохлажденном жидком кислороде выше, чем в воде при соответственных условиях, что определяется уровнем газосодержания жидкого кислорода, о чем упоминалось выше, и его более высокими, чем для воды, значениями плотности и сжимаемости, несмотря на то, что давление насыщенных паров кислорода при температуре испытаний выше упругости пара воды при комнатной температуре. Эрозии в жидком кислороде подвержены очень прочные материалы. Например, кавитационное разрушение высокопрочной стали с пределом текучести при комнатной температуре $\sigma_s = 100$ *кг / мм*^{2} ($\sigma_{s-196} = 135$ *кг / мм*^{2}) при статическом давлении 5 *атм* наблюдается уже после 40 *мин* кавитационного воздействия в жидком кислороде.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что повышением статического давления можно во много раз повысить эрозионную активность акустической кавитации в сжиженных газах при неизменной электрической мощности, подводимой к преобразователю. Повышение частоты ультразвука снижает эрозионную активность кавитации. Предложенный в работе [14] критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации, определенный как отнесенная к одному циклу колебаний средняя скорость изменения объема кавитационной полости в стадии захлопывания, изменяется обратнопропорционально частоте звука: $\varkappa = (R_{\max} / R_{\min})^3 / / \Delta t \cdot f$, где $R_{\max} / R_{\min}$ — максимальный относительный радиус кавитационной полости, Δt — время захлопывания полости, f — частота звука.

В заключение авторы благодарят В. Н. Давыдова за помощь в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Facilities and techniques employed at Lewis research center in experimental investigations of covitation in pumps. Symposium on cavitation research. Facilities and techniques. Phil, 1964, 60—16.
2. R. D. Finch, R. Kagiwada, M. Barmatz, J. Rudnick. Cavitation in liquid helium. Phys. Rev., 1964, **A134**, 1425—1428.
3. R. D. Finch, Taylor C. J. Wang. Visible cavitation in liquid helium. J. Acoust. Soc. America, 1966, **39**, 3, 511—514.
4. Peter D. Jarman, Kenneth J. Taylor. Some physical effects of acoustically. induced cavitation in liquid helium and in liquid nitrogen. J. Acoust. Soc. America, 1966, **393**, 584—585.
5. Ю. Е. Крот, Д. Н. Большуткин, В. В. Гавранек. Некоторые особенности кавитационной эрозии металлов в жидком кислороде. Физико-химич. механика матер., 1969, **5**, 2, 214—217.
6. В. А. Акуличев. Пульсации кавитационных полостей. В кн. «Физика и техника мощного ультразвука», II. М., «Наука», 1968.

7. М. Г. Сиротюк. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. В кн. «Физика и техника мощного ультразвука», II. М., «Наука», 1968.
8. Л. Д. Розенберг. Кавитационная область. В кн. «Физика и техника мощного ультразвука», II. М., «Наука», 1968.
9. Г. Флинн. Физика акустической кавитации в жидкостях. Физическая акустика, IБ, М., «Мир», 1967.
10. А. Д. Перник. Проблемы кавитации. Л., Судостроение, 1966.
11. Б. А. Агранат, О. Д. Кириллов, Н. А. Преображенский, Н. Н. Хавский, И. А. Якубович. Ультразвук в гидрометаллургии. М., «Металлургия», 1969.
12. И. И. Теумин. Введение ультразвуковых колебаний в обрабатываемые среды. В кн. «Физика и техника мощного ультразвука», I. М., «Наука», 1967.
13. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров. Влияние статического давления на акустические свойства кавитирующей жидкости. Акуст. ж., 1969, **15**, 4, 605—607.
14. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров. Критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации. Докл. АН СССР, 1968, **179**, 4, 821—824.

Уральский политехнический институт
им. С. М. Кирова
Свердловск

Поступила в редакцию
1 июня 1970 г.