АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том II 1956 Вып. 2

О МЕХАНИЗМЕ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК В ЗВУКОВОМ ПОЛЕ

А. С. Бебчук, Л. О. Макаров, Л. Д. Розенберг

Изучение процесса кавитационного разрушения пленки, нанесенной на поверхность стекла, произведенное при помощи ускоренной киносъемки, показало, что имеют место по крайней мере два различных процесса. Первый из них связан с захлопыванием пузырьков вблизи поверхности пленки и приводит к сильным локальным разрушениям; второй обусловлен проникновением пузырьков под пленку и вызывает ее отслаивание.

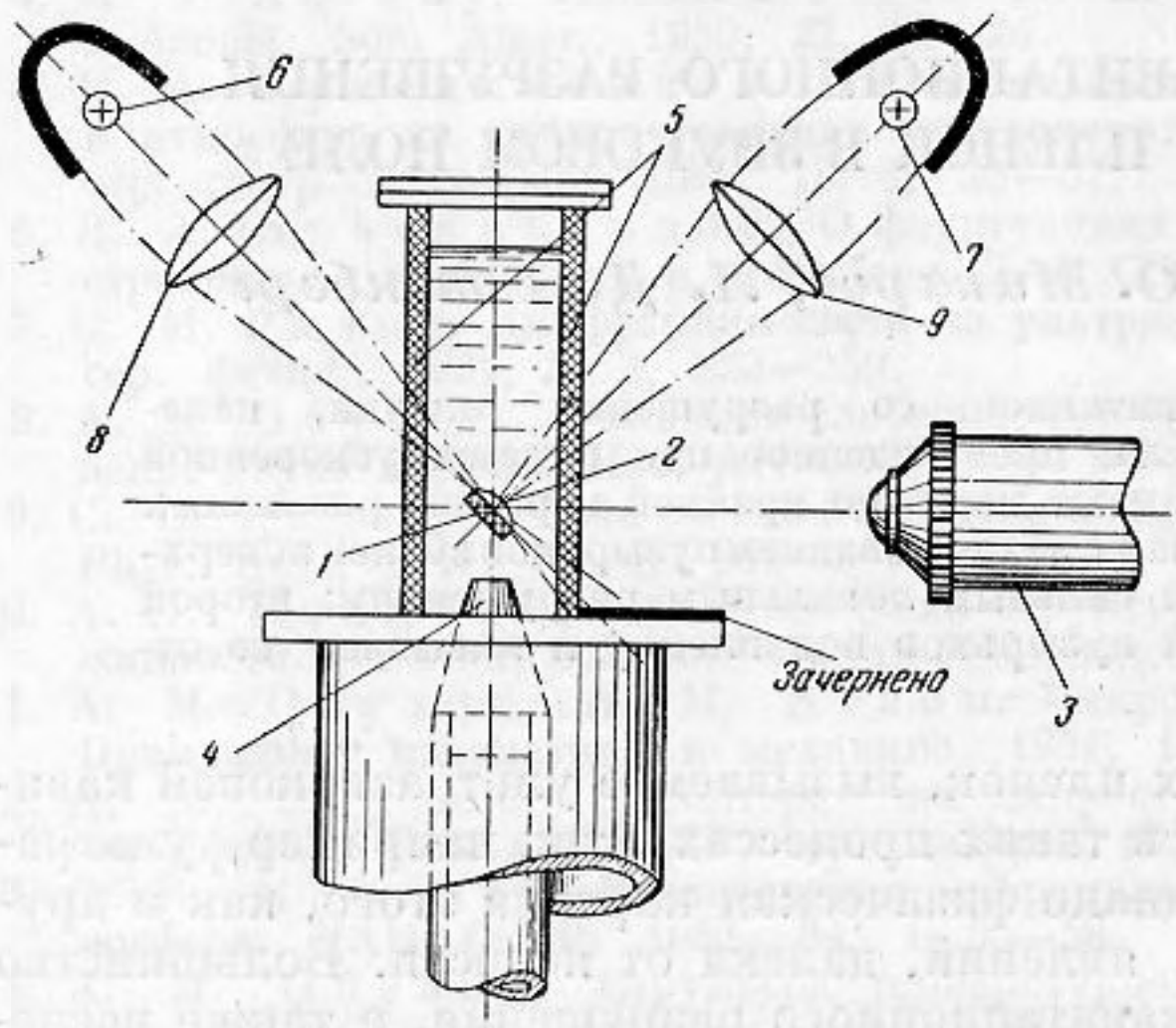
Разрушение поверхностных пленок, вызываемое ультразвуковой кавитацией, широко применяется в таких процессах, как, например, ультразвуковая очистка и пайка. Однако физическая картина этого, как и других, связанных с кавитацией явлений, далека от ясности. Большинство авторов изучало результаты кавитационного разрушения, а также исследовали кавитационную стойкость различных материалов (см. [1] и приведенную там литературу); однако из этих работ нельзя получить представления о механизме разрушения. В других работах, посвященных ультразвуковой очистке, встречаются указания на то, что наряду с кавитацией существенное значение играют также и большие ускорения, развивающиеся в интенсивном звуковом поле [2]; некоторые авторы [3] склонны весь процесс очистки объяснять действием этих ускорений.

Настоящая работа содержит результаты наших предварительных исследований физических процессов разрушения химически пассивных по отношению к жидкости покрытий, нанесенных на поверхность твердого тела, находящегося в интенсивном звуковом поле. Исследование производилось методом скоростной киносъемки*. В качестве основного объекта был избран тонкий слой канифоли, который наносился в виде спиртового раствора на поверхность стеклянной пластинки и тщательно высушивался. Для того чтобы лучше отличать обломки пленки от кавитационных пузырьков, в слой вводился измельченный графит. Так как примененная нами узкопленочная камера СКС-1 позволяла проводить съемку со скоростью, не превышающей 4000 кадров в *сек*, то мы остановились на сравнительно низкой частоте — около 8 *кгц*. Источником звука служил стержневой магнитострикционный вибратор, выполненный в виде разрезанного вдоль оси никелевого цилиндра длиною 300 *м*, диаметром 25 *мм*, при толщине стенки 2 *мм*. С верхней стороны цилиндр был закрыт припаянной латунной пробкой в виде усеченного конуса с площадкой на вершине диаметром 4—5 *мм*. Этот конец вибратора вводился через резиновую диафрагму в прямоугольный рабочий сосуд размерами 40×10×50 *мм*, боковые стенки которого были сделаны из оптически плоскопараллельных стеклянных пластинок. Нижний конец вибратора охватывался катушкой высокочастотного генератора, который мог отдавать до 8 *квт* колебательной мощности. Озвучивание производилось в дестиллированной воде.

---

* Оператор инж. В. В. Лебедев (Лабор. научно-прикладной фотографии и кинематографии АН СССР).

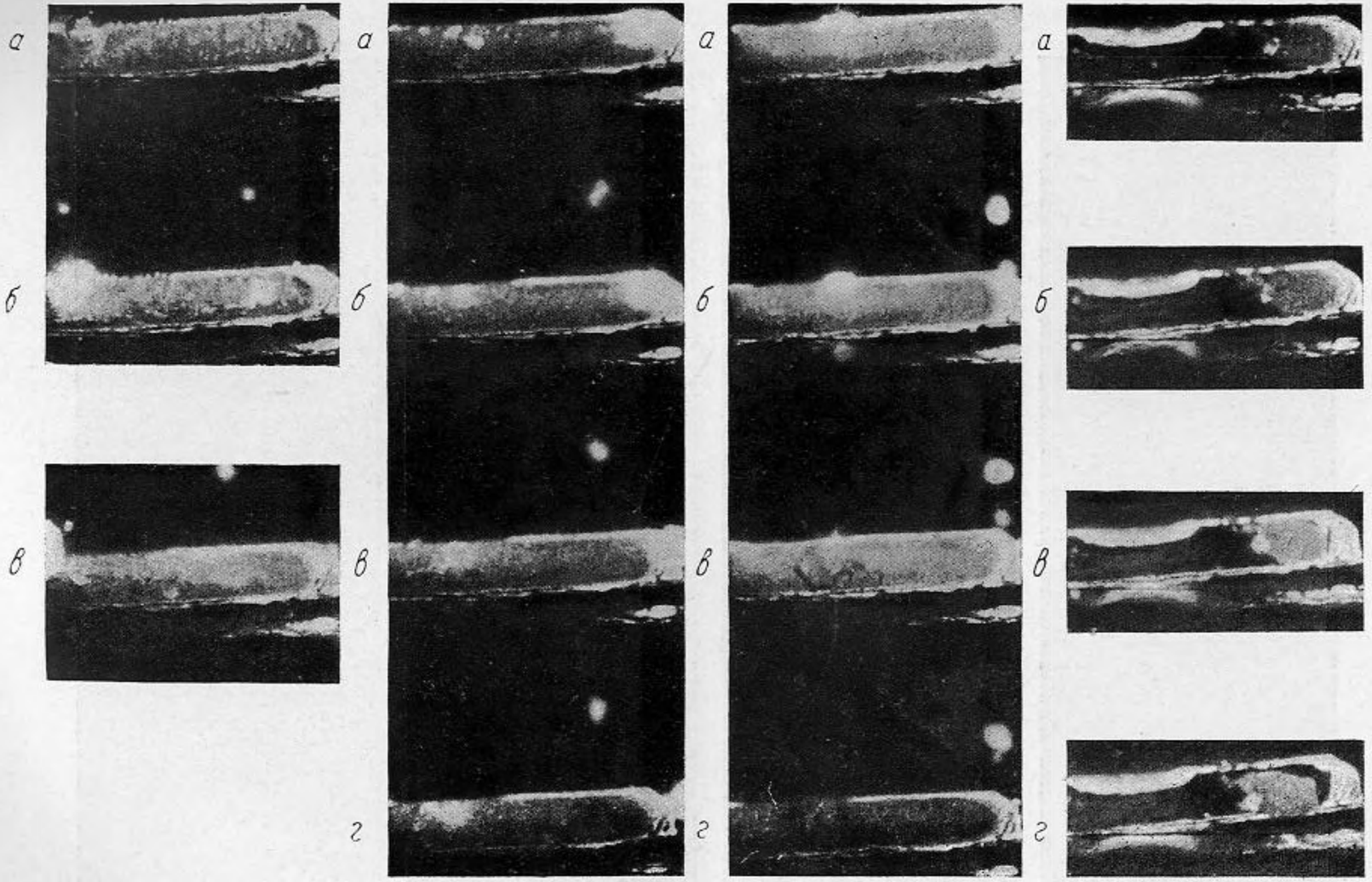
Так как на данном этапе нас интересовала качественная картина, то измерения звукового поля не производились. Было испробовано много вариантов расположения аппаратуры, из которых наиболее удачным оказался приведенный на фиг. 1. Стеклянная пластинка, на которую наносился исследуемый слой, располагалась под углом около 45° по отношению к оптической оси объектива кинокамеры. Объект освещался световыми потоками от двух источников света, сконцентрированными при помощи конденсорных линз в исследуемой точке звукового поля. Как видно из показанной на фиг. 1 схемы эксперимента, мощный световой поток от трехкиловаттного источника света падал на пластинку нормально к ее поверхности, причем ось этого светового потока была расположена под углом 45° к оптической оси объектива кинокамеры, что практически исключало прямое прохождение света в объектив. Второй, полукиловаттный источник света был расположен таким образом, что ось его светового потока проходила вдоль поверхности пластинки. Участки поверхности, которые могли создать нежелательные отражения, попадающие в объектив, были зачернены. Тонкий слой канифоли наносился на поверхность стеклянной пластинки шириною 3 *мм* в виде небольшого пятна в центральной части. Приведенные снимки получены объективом со светосилой 1 : 4 при фокусном расстоянии $F = 85$ *мм*. При демонстрации снятого материала со скоростью 24 кадра в секунду получалось замедление процесса не менее, чем в 60 раз.



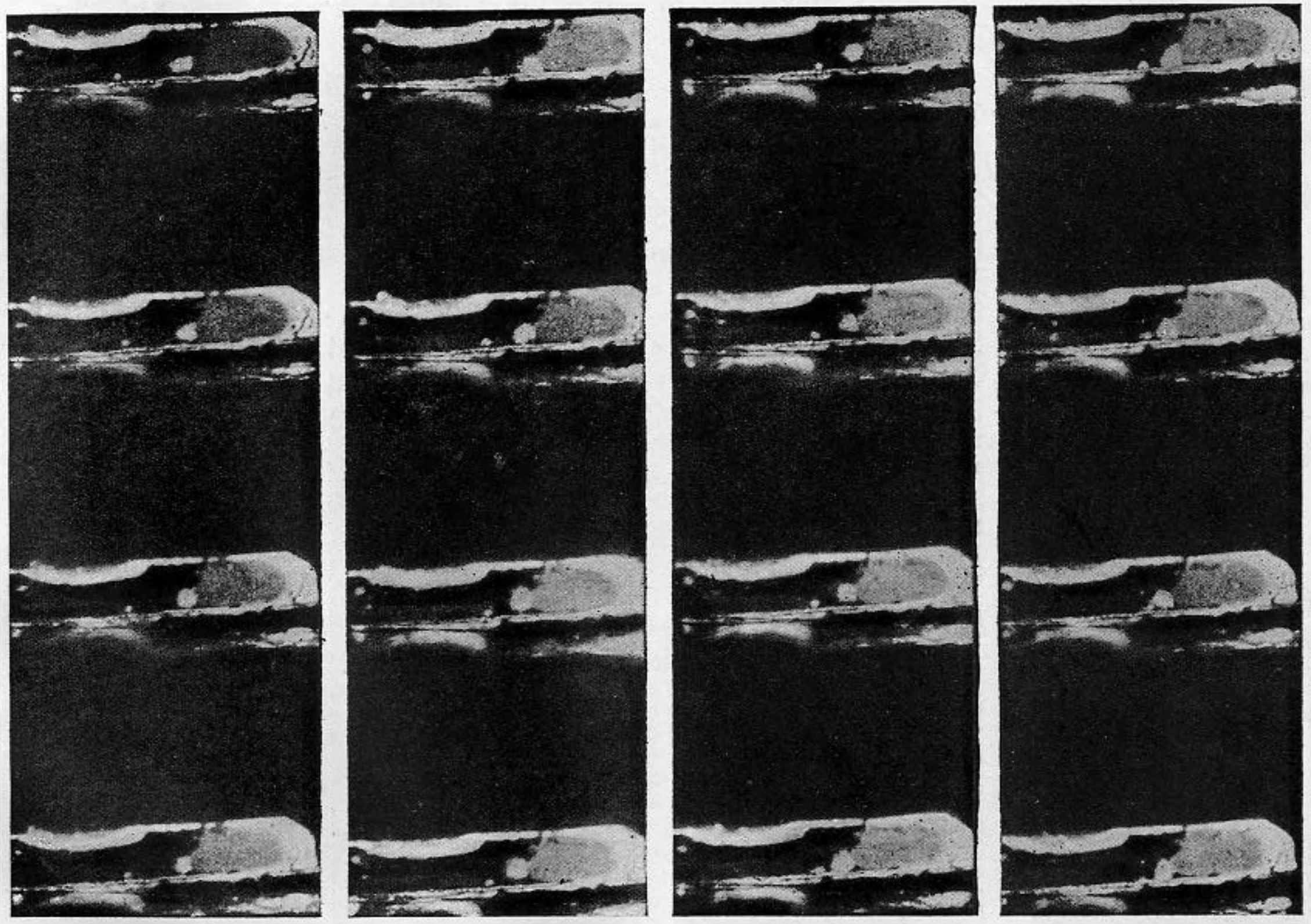
Фиг. 1. Схема расположения аппаратуры:

1—стеклянная пластинка, *2*—разрушаемая пленка, *3*—объектив кинокамеры, *4*—конец стержневого магнитострикционного вибратора, *5*—плоско-параллельные оптические стекла, *6*—источник света 0,5 *квт* с зеркальным рефлектором, *7*—источник света 3,0 *квт* с зеркальным рефлектором, *8* и *9*—конденсорные линзы

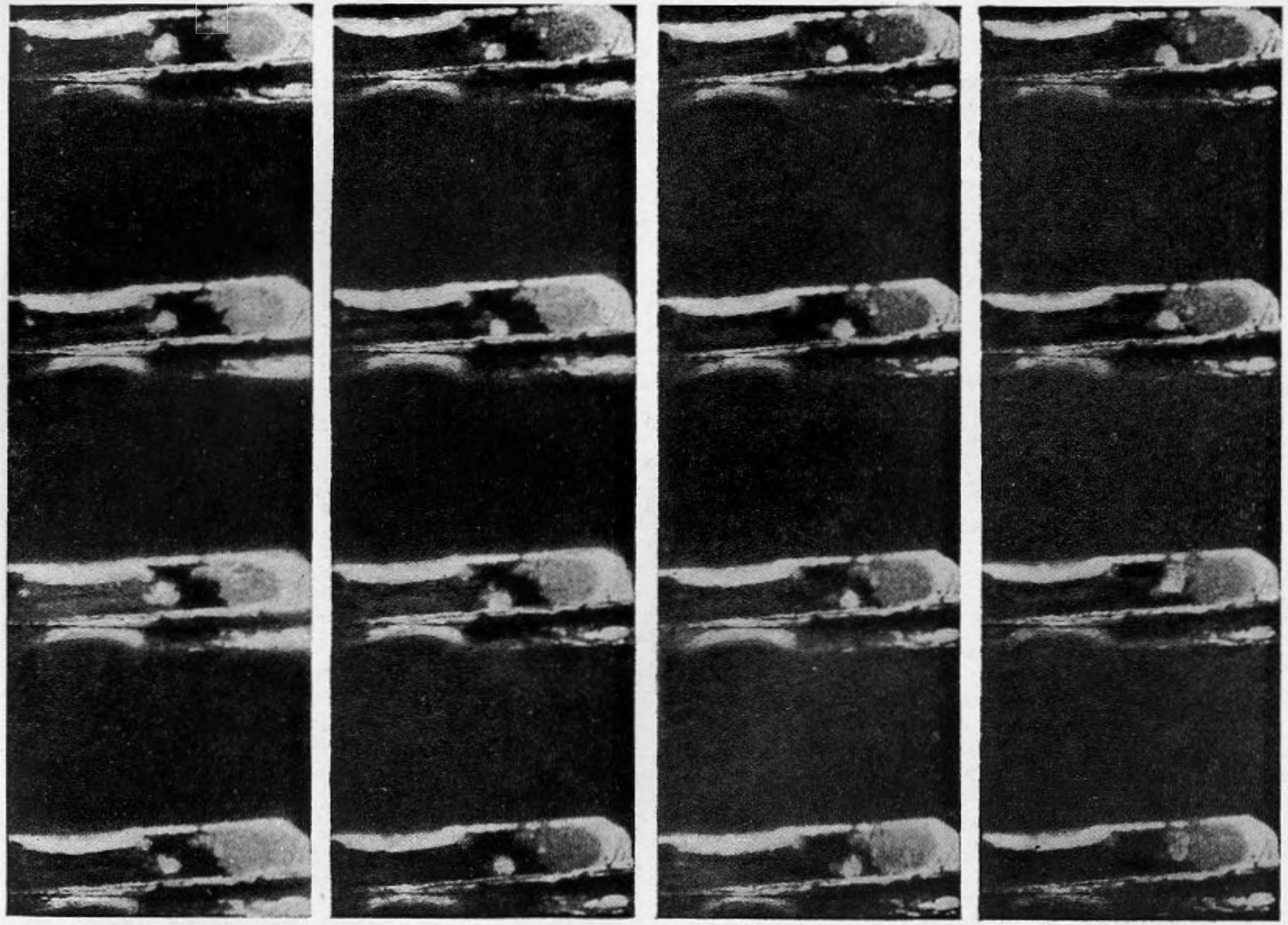
Просмотр полученного материала показал, что наблюдается по меньшей мере два различных механизма разрушения пленок. Первый из них показан на фиг. 2, где приведены отдельные кадры, относящиеся к начальной фазе разрушения. На фиг. 2,*а* показан вид пластинки с нанесенной на нее пленкой; слева — пузырь воздуха диаметром ~1,7 *мм*; на остальной поверхности — мелкие воздушные пузырьки; звуковое поле отсутствует. На фиг. 2,*б* (следующий по времени кадр) звук включен: у большого пузыря, а также у маленьких пузырьков изменилась фактура поверхности,— они стали жемчужными, что свидетельствует о начавшихся интенсивных колебаниях. Затем большой пузырь начинает (повидимому под действием пондеромоторных сил звукового поля) смещаться влево и постепенно уходит за пределы кадра. Средняя скорость этого перемещения — около 0,5 *м/сек*. Параллельно с уходом первого пузыря в правой части кадра зарождается второй пузырь; на фиг. 2,*в* показан момент, когда первый пузырь наполовину скрылся, а второй находится в стадии формирования: видны два больших пузыря, которые затем сливаются в один. Второй пузырь, просуществовав некоторое время (около 10 *мсек*), уходит вправо (фиг. 3) со скоростью около 1 *м/сек* и тоже скрывается за пределами кадра. Одновременно левее середины кадра несколько мелких пузырьков, сливаясь, образуют третий пузырь. Этот последний довольно быстро выра-



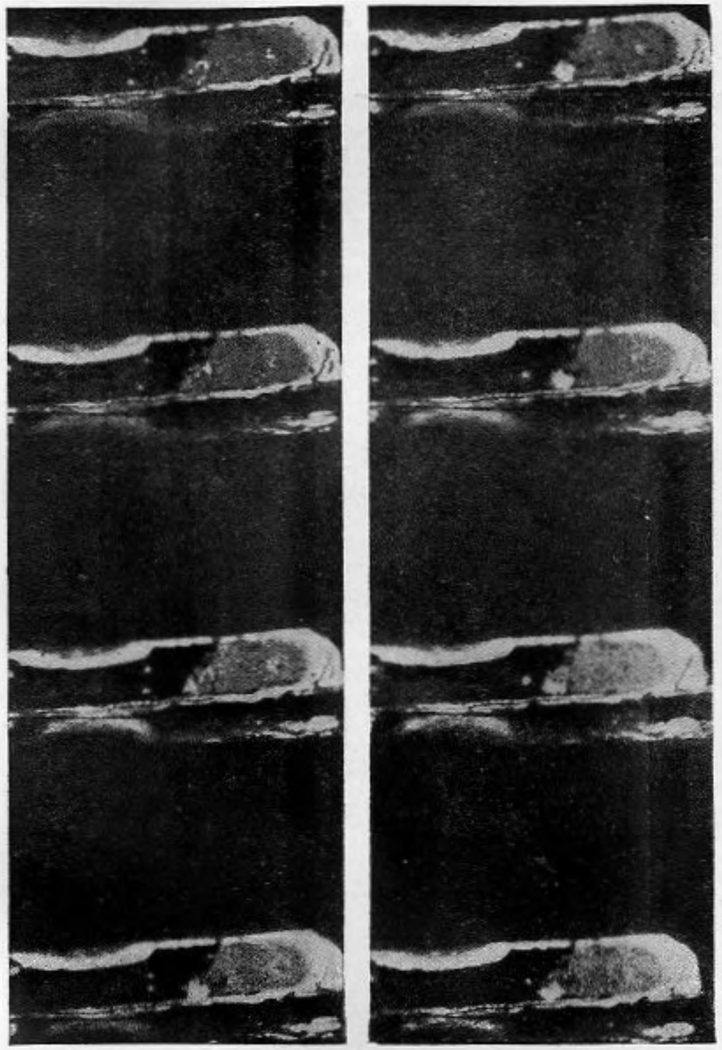
Фиг. 2. Фиг. 3 Фиг. 4 Фиг. 5.



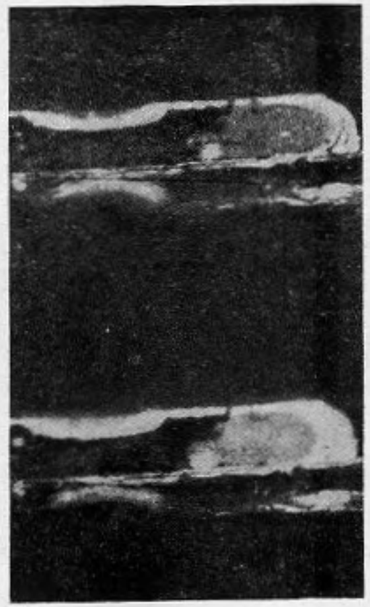
Фиг. 6

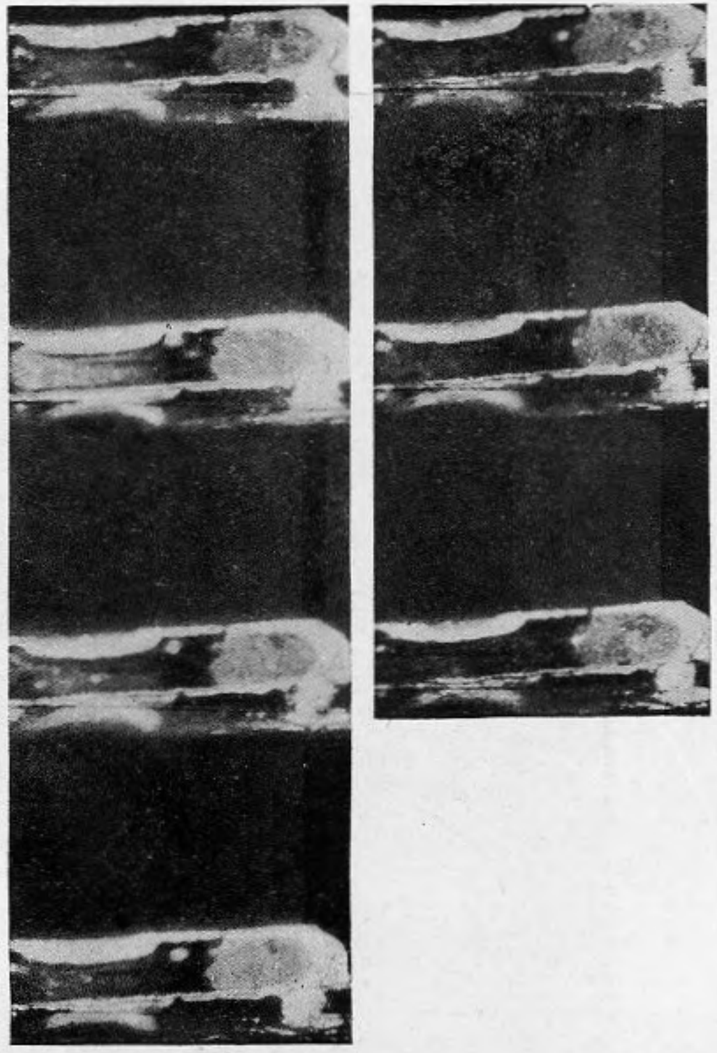


Фиг. 7



Фиг. 8





Фиг. 9

стает до диаметра 1,8 ÷ 2,0 *мм* и стационарно колеблется в течение 10 *мсек*, оставаясь на одном месте.

Последние два кадра, относящиеся к его стационарному состоянию, показаны на фиг. 4,*а* и *б*. Следующие два кадра (*в* и *г*) соответствуют процессу его аннигиляции. Совершенно четко видно, что этот момент связан с сильным разрушением прилежащей к пузырьку части пленки; на фиг. 4,*в* ясно видны трещины, а на фиг. 4,*г* — вырванный кусок пленки разбит на мелкие части, которые уносятся звуковым ветром.

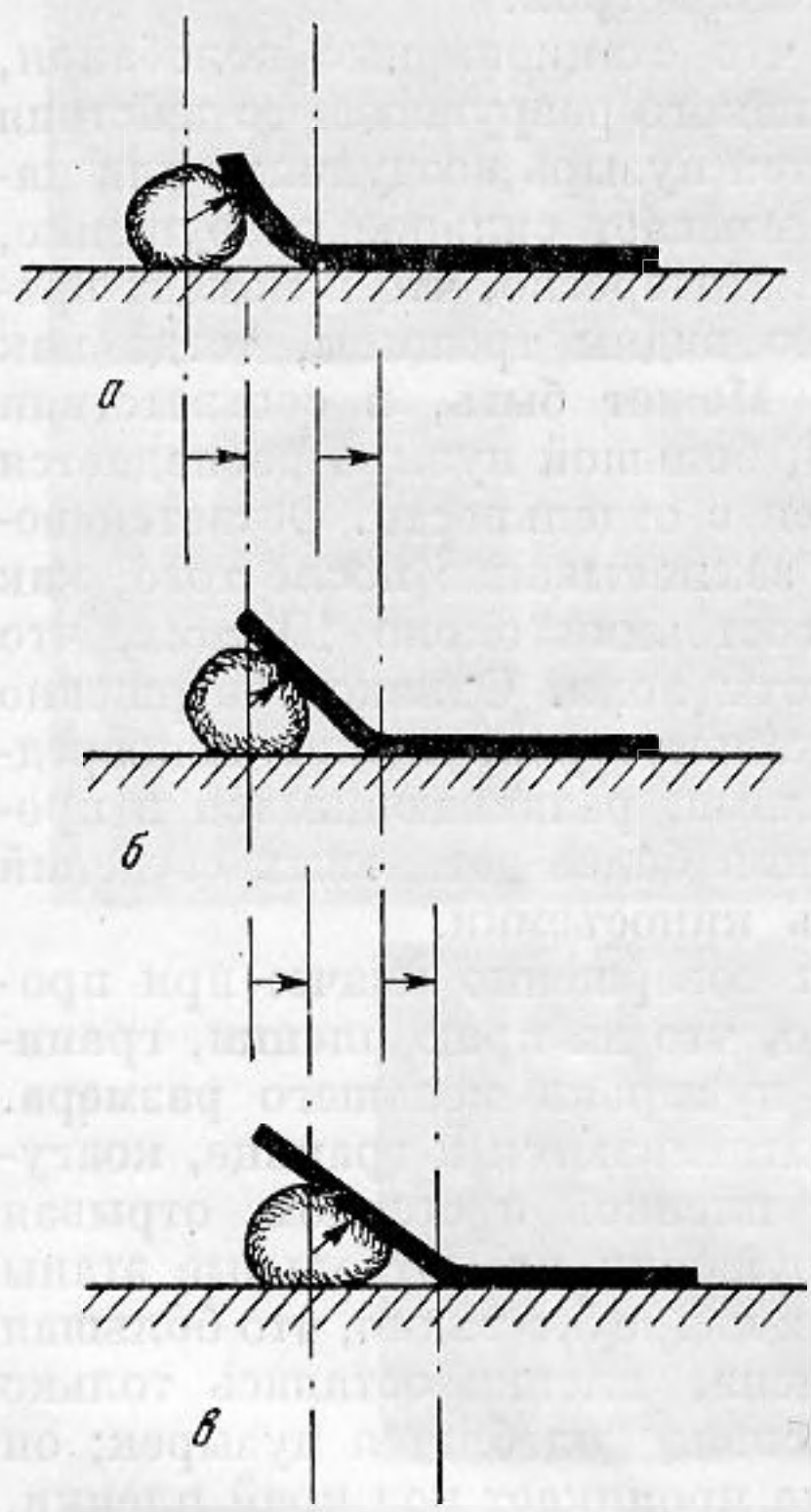
Из приведенных фотографий следует, что стационарные колебания, даже большой амплитуды, не оказывают никакого разрушающего действия на саму пленку, независимо от того, является пузырь воздушным или кавитационным. Захлопывание же пузыря вызывает сильное разрушение, локализованное вблизи места аннигиляции. Интересно, что в момент времени, соответствующий фиг. 4,*в*, уже ясно видны трещины, тогда как пузырь еще захлопнулся не полностью. Может быть, в соответствии с гипотезой, высказанной Корнфельдом [4], большой пузырь распадается на части, каждая из которых захлопывается в отдельности. Остается неясным, под влиянием чего происходит это захлопывание после того, как пузырь просуществовал в стационарном состоянии около 10 *мсек*, что соответствует 120 периодам основной частоты поля. Однако совершенно очевидно, что это быстрое, дробящее, локальное разрушение непосредственно связано с какими-то ударными силами, развивающимися в процессе аннигиляции пузырька. Для получения более детальных сведений необходима значительно бо́льшая скорость киносъемки.

Второй механизм разрушения выглядит совершенно иначе: при просмотре дальнейшей части кинофильма видно, что на краю пленки, граничащем с местом разрушения, образуются пузырьки меньшего размера. Другие пузырьки, образуясь в стороне, подтягиваются к границе, коагулируют друг с другом, проникают между пленкой и стеклом, отрывая и сдвигая большие куски пленки без разрушения их. Отдельные этапы этого процесса показаны на кадрах фиг. 5. На кадре 5,*а* видно, что бо́льшая часть поверхности пластинки уже очищена, пленка осталась только у правого края. На границе пленки интенсивно колеблется пузырек; он отрывает небольшие кусочки пленки, иногда проникает под край пленки, делаясь при этом частично невидимым. Другие пузырьки (не показанные на приведенных кадрах) садятся на край пленки, проникают между пленкой и стеклом и перестают быть видимыми. Затем в правой части пленки появляется вертикальная трещина (5,*б*). Через некоторое время к ней добавляется еще одна, направленная почти под прямым углом к первой (5,*в*). После этого весь оставшийся кусок пленки медленно сползает со своего места по направлению к переднему краю стеклянной пластинки и уносится потоком (5,*г*).

Весь описанный выше процесс, несомненно, тесно связан с коагуляцией кавитационных пузырьков, — явлением, играющим существенную роль во всем их поведении. Однако если при обычной коагуляции пузырек большего размера, оставаясь на месте, втягивает в себя маленький пузырек, то при наличии края пленки картина меняется. Пузырек, находящийся на краю, всегда стоит на месте, а второй приближается к нему, независимо от соотношения их размеров. Так, на фиг. 6 показано подтягивание маленького пузырька к большому, сидящему на краю пленки, а на фиг. 7, наоборот, — подтягивание большого к маленькому. На фиг. 8 виден процесс коагуляции двух маленьких пузырьков в один, несколько большего размера, с последующим втягиванием его в большой, сидящий на краю пленки.

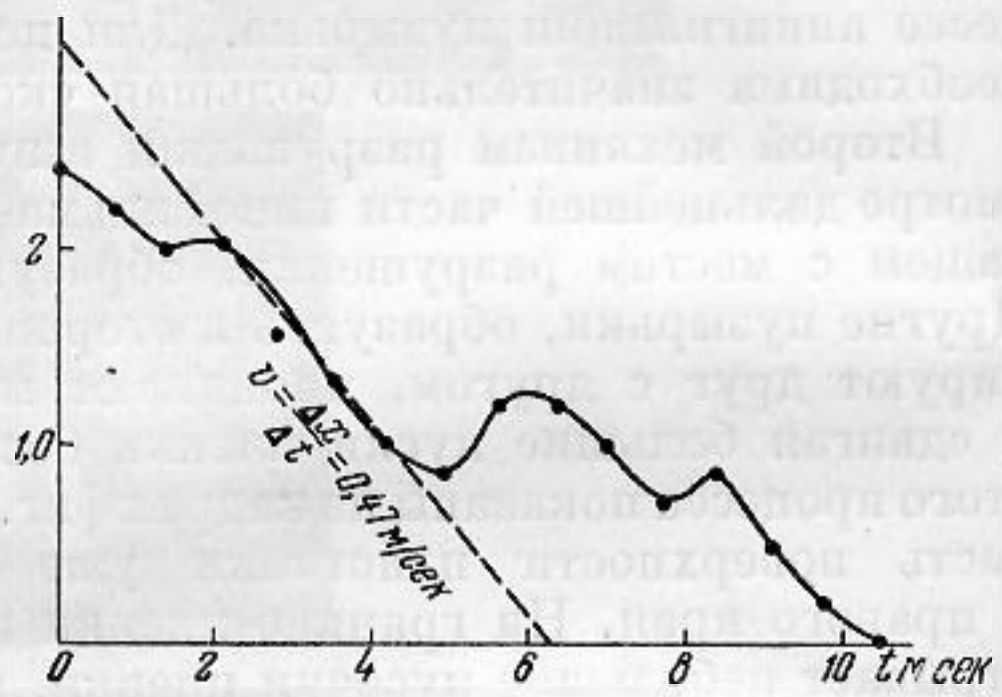
Можно высказать предположение, что здесь играют роль силы трения, удерживающие на месте пузырек, сидящий на краю. В пользу этого соображения говорит также рассмотрение последних трех кадров фиг. 7, из которых видно, что большой пузырек движется по направлению к маленькому

кому только до тех пор, пока он сам не подходит к краю пленки. Здесь он вытягивает маленький пузырек из «гнезда», в котором тот сидел. Но, производя эту операцию, он не останавливается, а продолжает двигаться дальше и занимает место, на котором сидел маленький пузырек. Таким образом, предположение о роли сил трения не объясняет все наблюденные эффекты и не исключает предположения о «притягивающих» свойствах края пленки. Последнее предположение подтверждается также случаем, изображенным на фиг. 9, где видно, как пузырек подтягивается к «пустому» краю, к месту, где нет никаких других пузырьков, и подтянувшись, начинает «залезать» под край пленки.



Фиг. 10. Предполагаемый механизм отрыва пленки от поверхности *а*, *б*, *в*

Основываясь на полученном экспериментальном материале, можно высказать следующую гипотезу, объясняющую второй механизм разрушения пленок. В результате взаимодействия поверхностных сил, кавитационный пузырек, как и всякий другой пузырек, стремится прилипнуть к твердой поверхности, замещая ею часть своей поверхности. На краю пленки, у места ранее произшедшего разрушения, безусловно есть такие участки, на которых край пленки отстает от поверхности пластинки. Попавши на такое место, пузырек прилипнет не только к поверхности пластинки, но и к внутренней поверхности свободного края пленки, как это изображено схематически на фиг. 10,*а*. Заняв такое «устойчивое» положение, пузырек не прекращает колебаться; в результате его интенсивных колебаний на пленку начинают действовать усилия, отрывающие ее от поверхности. Если силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободный кусочек ее просто оторвется; если же прочность пленки превосходит силы сцепления, то часть пленки отделится от поверхности. При этом пузырек, стремясь сохранить свое прежнее положение по отношению к пленке и к пластинке, сдвинется по направлению к неотделившемуся участку пленки, заходя под уже отделившуюся от поверхности часть, как это схематически показано на фиг. 10,*б* и 10,*в*. Процесс этот будет продолжаться до тех пор, пока вся пленка не отделится от поверхности, или пока отделившийся кусок пленки не оторвется.



Фиг. 11. Перемещение коагуляционного пузырька

Таким образом, кавитационные пузырьки, наряду с ударным разрушающим действием, проявляющимся в момент их аннигиляции, могут, сравнительно более медленно, совершая стационарные колебания, отрывать пленку от поверхности.

При выполнении настоящей работы не ставилась задача изучения процесса коагуляции пузырьков. Однако полученные результаты позволяют установить некоторые обстоятельства, которые могут оказаться небесполезными при дальнейших исследованиях. В процессе подтягивания пузырьки далеко не всегда движутся по прямой линии; часто, как, например, это показано на фиг. 6, они описывают сложные траектории с остановками по пути. На фиг. 11 показана кривая изменения расстояния между пузырьками в функции времени для случая, изображенного на фиг. 6. Существенным является то обстоятельство, что все четыре участка, на которых происходит сближение, проходятся пузырьком с примерно одинаковой скоростью, которая составляет около 0,5 *м/сек*. Так как пузырек начинает свое движение на расстоянии 0,24 *см* от другого пузырька, а последняя зафиксированная точка соответствует расстоянию 0,02 *см*, то, повидимому, следует предположить, что на этих расстояниях движение пузырька обусловлено увлечением его потоком жидкости.

Обработка данных движения других пузырьков показала, что скорость их перемещения на участках сближения лежит в пределах 0,4—0,7 *м/сек*. Интересно напомнить, что, как было указано выше, скорость ухода больших пузырьков (фиг. 2 и 3) имеет тот же порядок: для пузырька № 1—0,5 *м/сек*, для пузырька № 2—1,0 *м/сек*.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. T. Ellis. Production of Accelerated Cavitation Damage by an Acoustic Field in a Cilindrical Cavity. J Acoust. Soc. Amer., 1955, 7, 5, 913—921.
2. Q. Mc Kenna. Ultrasonic cleaning of miniature devices. Trans. Inst. Rad. Eng., Ultrasonic Eng., May 1955, 3, 16—22.
3. S. Spizig. Vollkommenere Metallreinigung mit Ultraschall. Werkstadt und Betrieb, 1955, 88, 5, 239—242.
4. М. О. Корнфельд. Упругость и прочность жидкостей. ГТТИ. М.—Л., 1951

Акустический институт АН СССР
Москва

НИИ Министерства
радиотехнической промышленности
Москва

Поступила в редакцию
21 февраля 1956 г.