АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА ЧАСТОТЕ 500 *кгц*

М. Г. Сиротюк

При помощи сверхскоростной фоторегистрирующей установки исследовалось развитие и протекание кавитации на частоте 500 *кгц* в фокальном пятне ультразвукового концентратора. Выяснилось, что за один или несколько периодов акустических колебаний зародыш может превратиться в область кавитации размером в несколько десятых долей миллиметров. Оказалось, что порог кавитации для дегазированной воды составляет в фокальном пятне 380 *атм*.

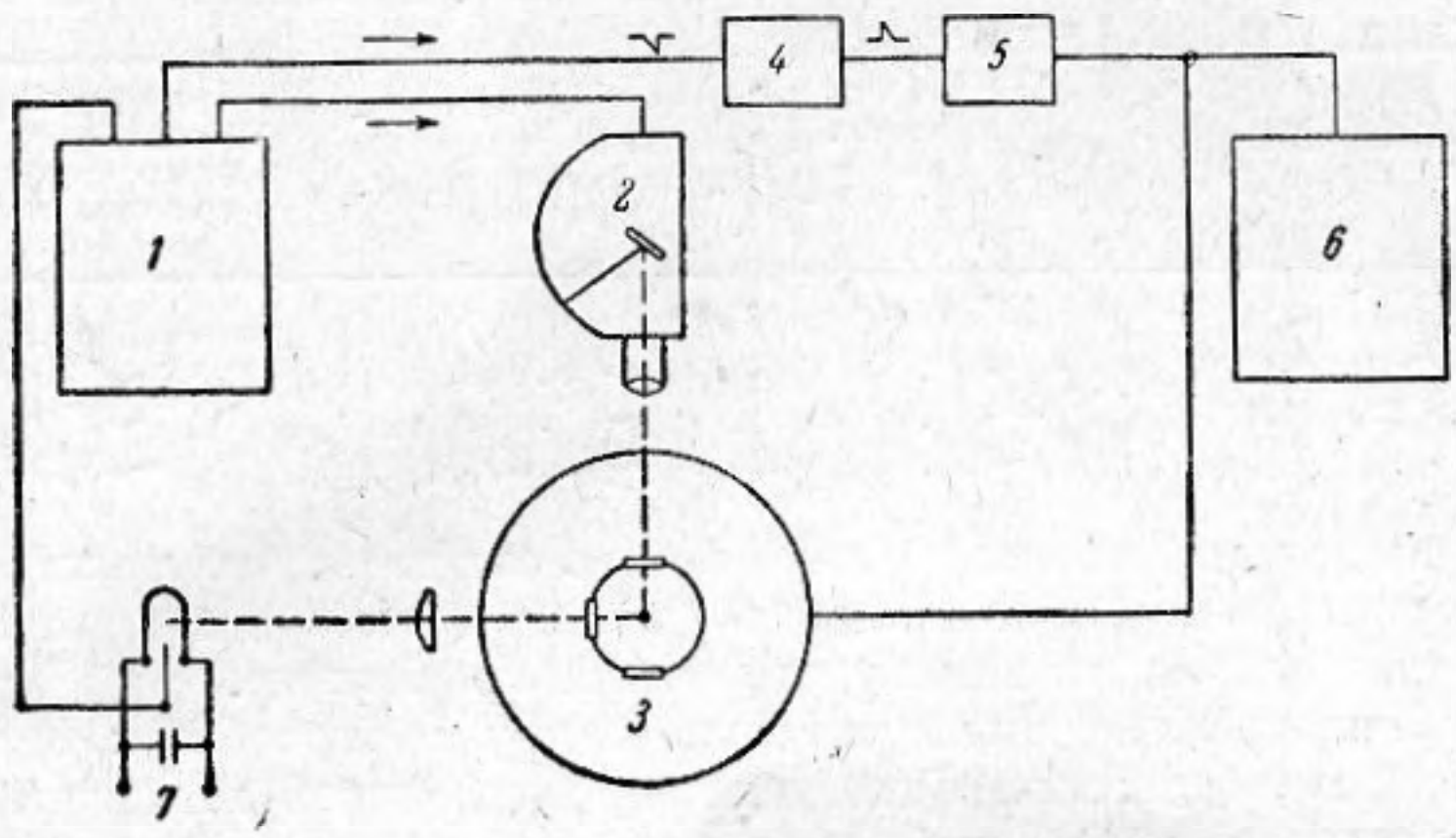
Исследование процесса развития ультразвуковой кавитации производилось в фокальной области концентратора, описанного в работе [1], на его резонансной частоте $\sim$ 500 *кгц*. Процесс кавитации изучался с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР. Камера СФР может быть использована либо как фоторегистратор с непрерывной разверткой исследуемого процесса на неподвижной кинопленке, либо как «лупа времени», дающая ряд последовательных фотографий процесса при скоростях съемки до $2{,}5 \cdot 10^6$ *кадр/сек*. При работе камеры в варианте «лупы времени» изображение при помощи двух объективов и ряда линз (линзовая вставка) строится на неподвижной кинопленке, расположенной по дуге окружности, в центре которой вращается зеркало. При вращении зеркала на пленке получается ряд кадров — изображений объекта. Пучок света переходит с одной линзы на другую при весьма малых поворотах зеркала и величина смазывания вертикального края изображения меньше, чем разрешающая способность оптической системы. На входном объективе расположены прямоугольные диафрагмы, смещенные по вертикали и горизонтали, ограничивающие время экспонирования каждого кадра.

Электронное синхронизирующее устройство камеры СФР позволяет синхронизировать начальное положение зеркала и инициирующий импульс со временем прихода акустических колебаний в район фокального пятна концентратора.

На фиг. 1 показана блок-схема экспериментальной установки для сверхскоростной киносъемки развития ультразвуковой кавитации: *1* — пульт управления СФР, *2* — камера СФР, *3* — ультразвуковой концентратор, *4* — ГИС-2, *5* — дифференцирующее устройство, *6* — электрический генератор, *7* — импульсная лампа. В момент включения электрического генератора, питающего концентратор, в дифференцирующем устройстве вырабатывается импульс, который подается на генератор прямоугольных импульсов ГИС-2. Генератор ГИС-2 позволяет получить на выходе импульс, задержанный относительно запускающего. При совпадении этого импульса с каким-либо из импульсов, образующимся при вращении зеркала в камере, электрическая схема пульта управления вырабатывает инициирующий импульс высокого напряжения, зажигающий лампу *7*. Полное время съемки примерно равняется длительности вспышки лампы.

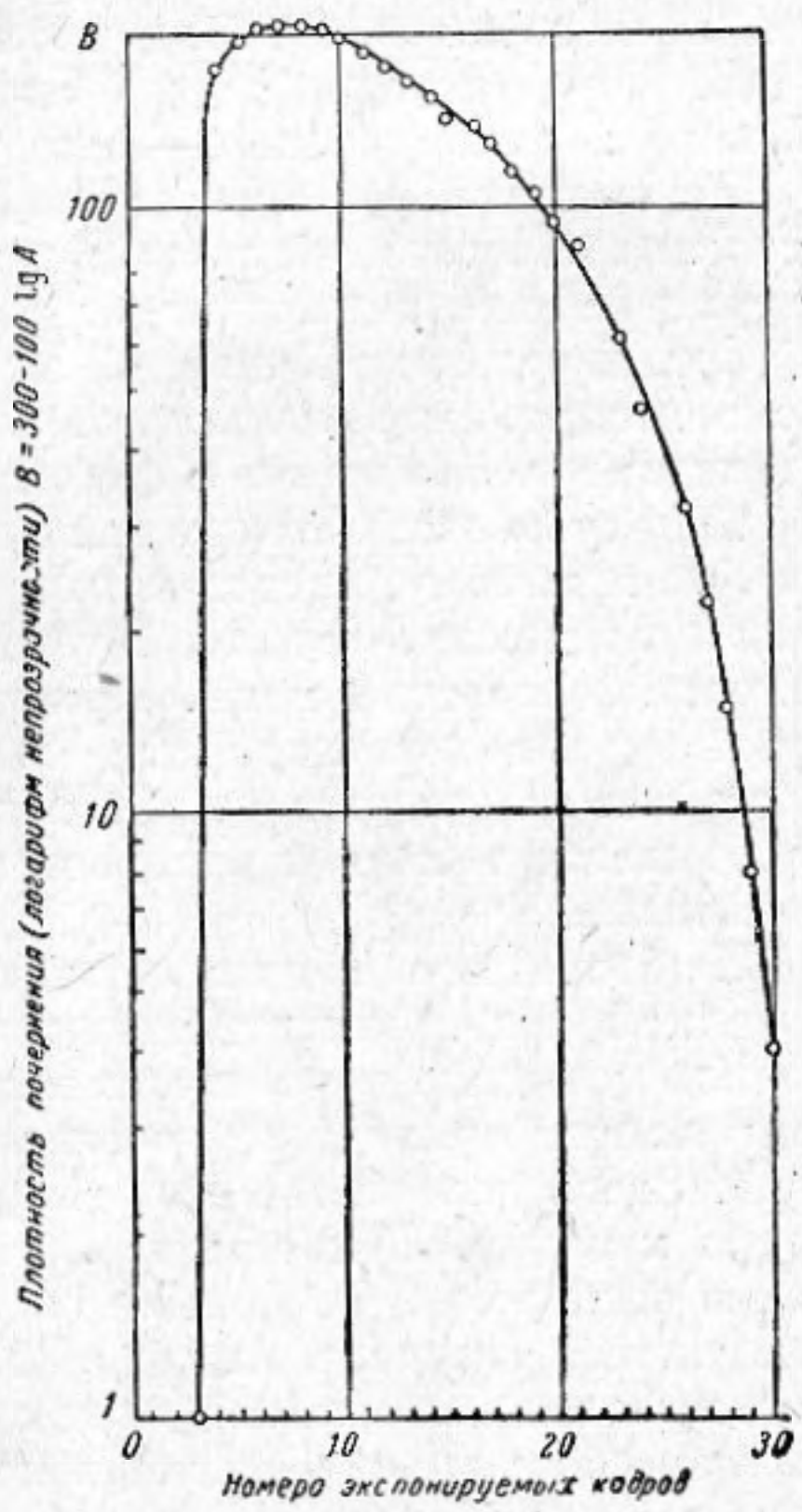
Нами использовалась импульсная лампа ИФК-120, работавшая при максимальной нагрузке. Для увеличения яркости применялась линза, концентрировавшая свет лампы в фокальной области концентратора.

Процесс развития кавитации фотографировался при частоте съемки $5 \cdot 10^5$ *кадр/сек*. При этом время экспонирования одного кадра составляло $2 \cdot 10^{-6}$ *сек*, т. е. на один кадр изображения приходился один период ультразвуковых колебаний. Количество кадров (при двухрядной линзовой вставке) было равно 60.



Фиг. 1

Как известно, разряд в импульсной лампе начинается практически сразу после подачи инициирующего импульса и максимум световой энергии приходится на первую половину общего времени разряда. Кинопленка при этом экспонируется неравномерно. Для определения этой неравномерности было произведено экспонирование пленки в камере от световой вспышки. На фиг. 2 по оси ординат отложена величина плотности почернения B, измеренная микрофотометром МФ-4, а по оси абсцисс — порядковые номера ряда последовательных кадров на кинопленке; время экспонирования каждого кадра постоянно ($2 \cdot 10^{-6}$ *сек*). Как видно из графика, достаточная плотность снимка достигается только, начиная с 3-го кадра, причем при экспонировании 6, 7 и 8 кадров яркость свечения такова, что плотность почернения кинопленки практически не изменяется. В дальнейшем яркость быстро падает.



Фиг. 2

Эксперименты по исследованию развития ультразвуковой кавитации проводились как в отстоявшейся при комнатной температуре, так и в тщательно дегазированной дистиллированной воде. Вода заливалась в реакторный стакан концентратора [1], который отделялся от остального внутреннего объема концентратора при помощи тонкой пленки. Дегазирование воды производилось под вакуумом при одновременном облучении ультразвуком, до полного прекращения выделения пузырей. Интенсивности звука и акустические давления в фокальном пятне кон-

центратора, соответствующие порогу возникновения кавитации в отстоявшейся и дегазированной воде, приведены в таблице.

Определение средней интенсивности звука производилось по методике, описанной в работе [2]. Пиковые интенсивности звука в центре фокального пятна находились графически на основании экспериментально полученного распределения давлений в пятне. Давления рассчитывались

Состояние воды	Средняя интенсивность звука в фокальном пятне, *вт/см²*	Пиковая интенсивность звука в центре фокального пятна, *вт/см²*	Пиковое давление в центре фокального пятна, *атм*
Отстоявшаяся	~ 2.000	~ 8.000	~160
Дегазированная	~ 6.000	~24.000	~270
»	~12.000	~48.000	~380

для синусоидальной волны. Однако можно ожидать, что при полученных очень больших величинах давлений форма волны будет пилообразной и пиковая величина давления будет несколько больше.

Возникновение кавитации отмечалось двумя способами: 1) при визуальном наблюдении зоны фокального пятна через микроскоп и 2) по возникновению кавитационного шума, воспринимаемого гидрофоном, помещенным от фокального пятна, на расстоянии 50 *мм*, чтобы не деформировать форму поля и не понизить порог возникновения кавитации.

На фиг. 3 показаны фотографии уже развивавшейся (стационарной) кавитации в отстоявшейся воде. Здесь, как и на других фигурах, приведен последовательный ряд позитивных отпечатков, взятых через один кадр. Перед первым кадром этой и последующих фигур дан линейный масштаб: одно деление — один *мм**.

На кадрах 2—3 экспозиция недостаточна вследствие малой яркости свечения импульсной лампы; кадры 4—12 переэкспонированы. Поэтому структура кавитации становится различимой, лишь начиная с 14-го кадра.

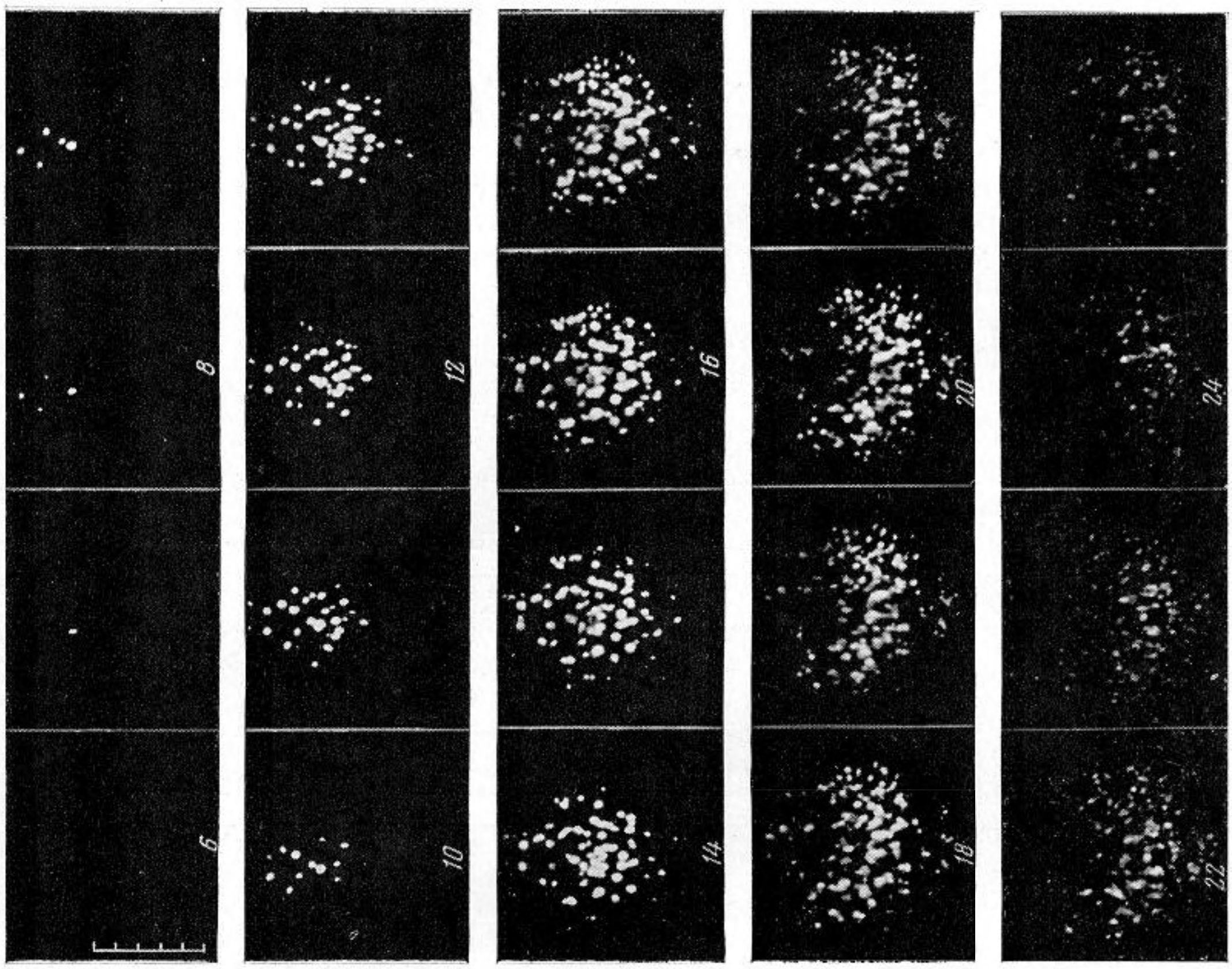
Сравнивая кадр 3 и какой-либо из последних кадров, например 21-й, можно видеть, что за время съемки — около $100 \cdot 10^{-6}$ *сек* — общая форма кавитационной области мало изменяется.

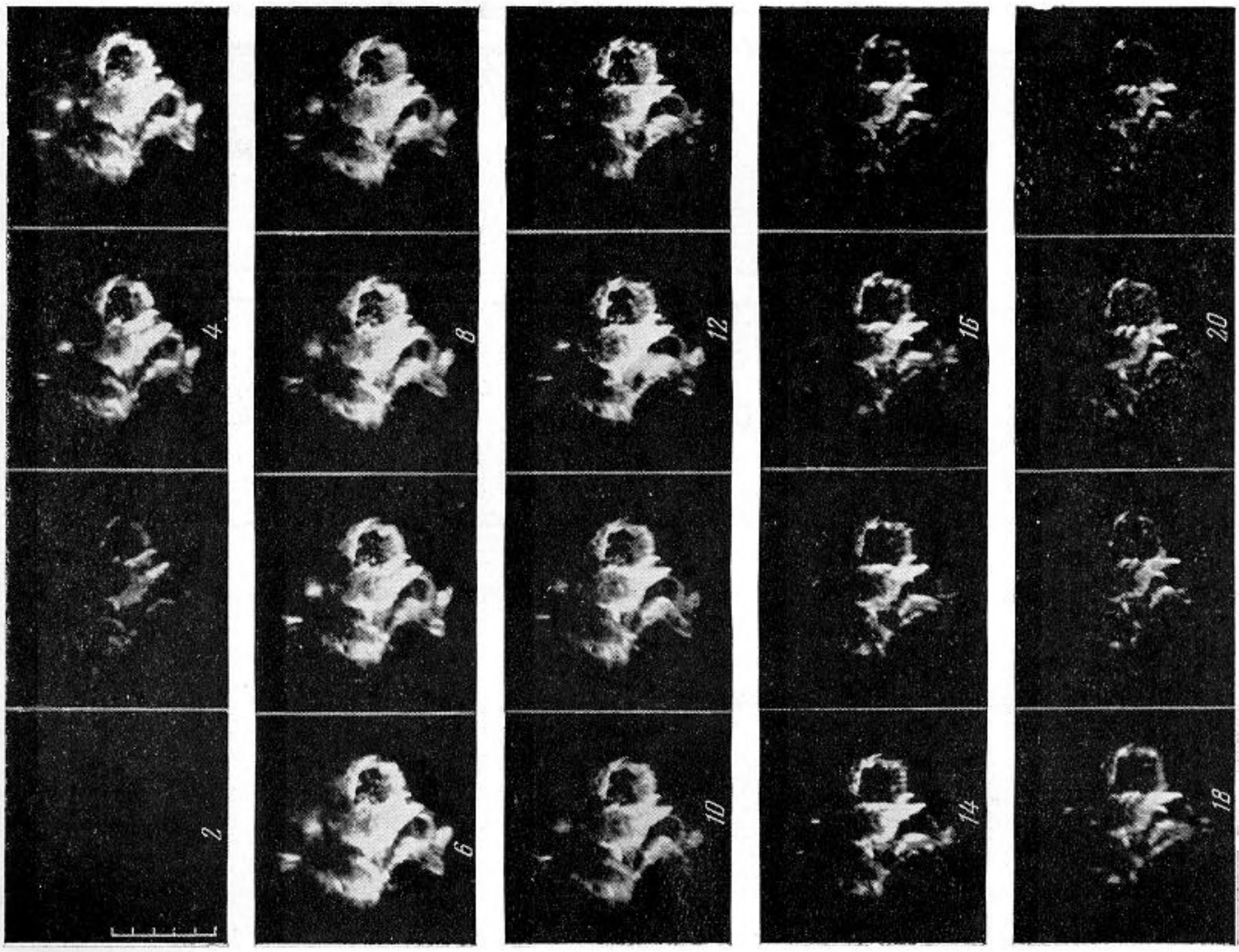
Вверху области кавитации на кадрах наблюдаются восходящие «ветви», по-видимому, представляющие собой движущиеся вверх, вместе с потоком жидкости, газовые пузырьки, образующиеся вследствие кавитационной дегазации воды. При кавитации в дегазированной воде таких пузырьков не наблюдается. В последнем случае, по-видимому, имеет место так называемая «паровая кавитация», когда кавитационная полость заполняется только парами воды и в полупериод сжатия захлопывается полностью.

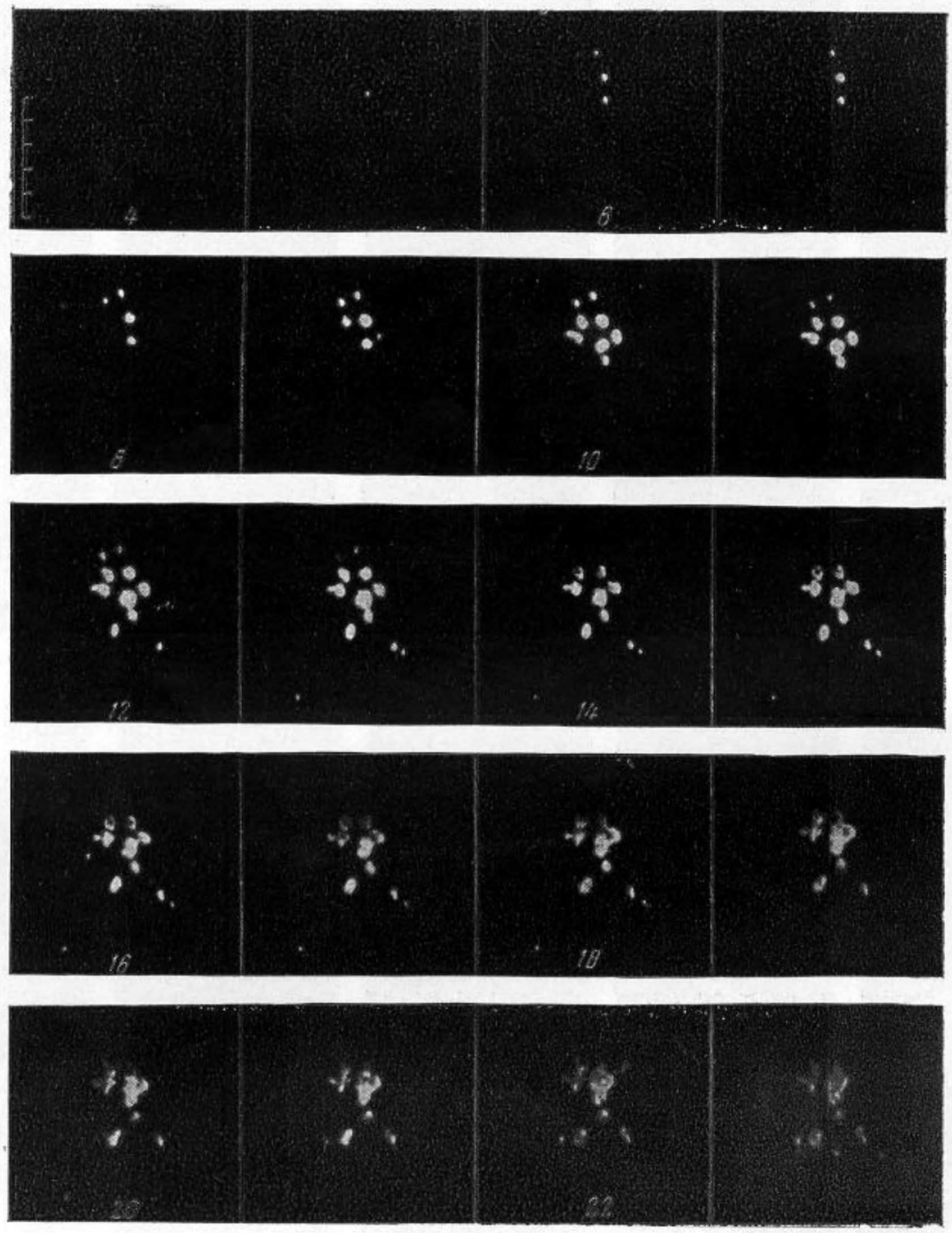
На фиг. 4 показан типичный процесс зарождения кавитации в дегазированной воде. Зарождение кавитации хорошо видно, поскольку она появляется лишь через шесть кадров после начала экспонирования пленки в момент прихода звуковых колебаний в фокальное пятно концентратора. Здесь количество кавитационных скоплений непрерывно растет от кадра к кадру. Непрерывно растут по величине и сами скопления; особенно наглядно это видно на фиг. 5. При оптимальной яркости свечения импульсной лампы, начиная с 20—21-го кадра здесь также лучше проявляется тонкая структура кавитационных скоплений; в то же время небольшие скопления кавитации из-за малой освещенности на снимке пропадают.

На основании проведенной экспериментальной работы и обработки большого числа фотографий, показывающих зарождение и протекание

* Заметим, что центр фотографий отвечает центру фокального пятна.


6
8
10
12
14
16
18
20
22
24


2
4
6
8
10
12
14
16
18
20



Фиг. 5

кавитации в фокальном пятне концентратора на частоте ~ 500 *кгц*, можно сделать следующие основные выводы:

1. Порог кавитации для отстоявшейся воды, в которой существуют нерастворимые газовые пузырьки, составляет ~160 *атм* (давление в центре фокального пятна); для дегазированной воды он возрастает в отдельных случаях до ~ 380 *атм* (см. таблицу).

2. Кавитация зарождается, как правило, не в центре фокального пятна. Это значит, что для появления кавитации наряду с большим давлением необходимо также и наличие зародышей, местоположение которых случайно, а их количество невелико.

3. За один или несколько периодов акустических колебаний зародыш может превратиться в область кавитации, имеющую диаметр в несколько десятых долей миллиметров (см., например, фиг. 5). В дальнейшем область кавитации растет от периода к периоду и за время нескольких десятков, а иногда и сотен микросекунд достигает размера нескольких миллиметров в диаметре.

Автор пользуется случаем поблагодарить Л. Д. Розенберга за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Розенберг, М. Г. Сиротюк. Установка для получения фокусированного ультразвука высокой интенсивности. Акуст. ж., 1959, 5, 2, 206—211.
2. М. Г. Сиротюк. О балансе энергии в концентраторе, предназначенном для получения ультразвука высокой интенсивности. Акуст. ж., 1960, 6, 3, 410—411.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
4 июня 1961 г.