АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 6

УДК 534.29:532.783

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ И ЛАЗЕРНАЯ КАВИТАЦИЯ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Р. Г. Валеев, П. И. Голубничий, К. Ф. Олзоев

Приведены экспериментальные данные по возбуждению в жидкокристаллических системах кавитационных явлений, инициированных мощными ультразвуковыми импульсами и сфокусированным лазерным излучением.

Отмечается ряд особенностей протекания ультразвуковой и лазерной кавитации в мезоморфном состоянии.

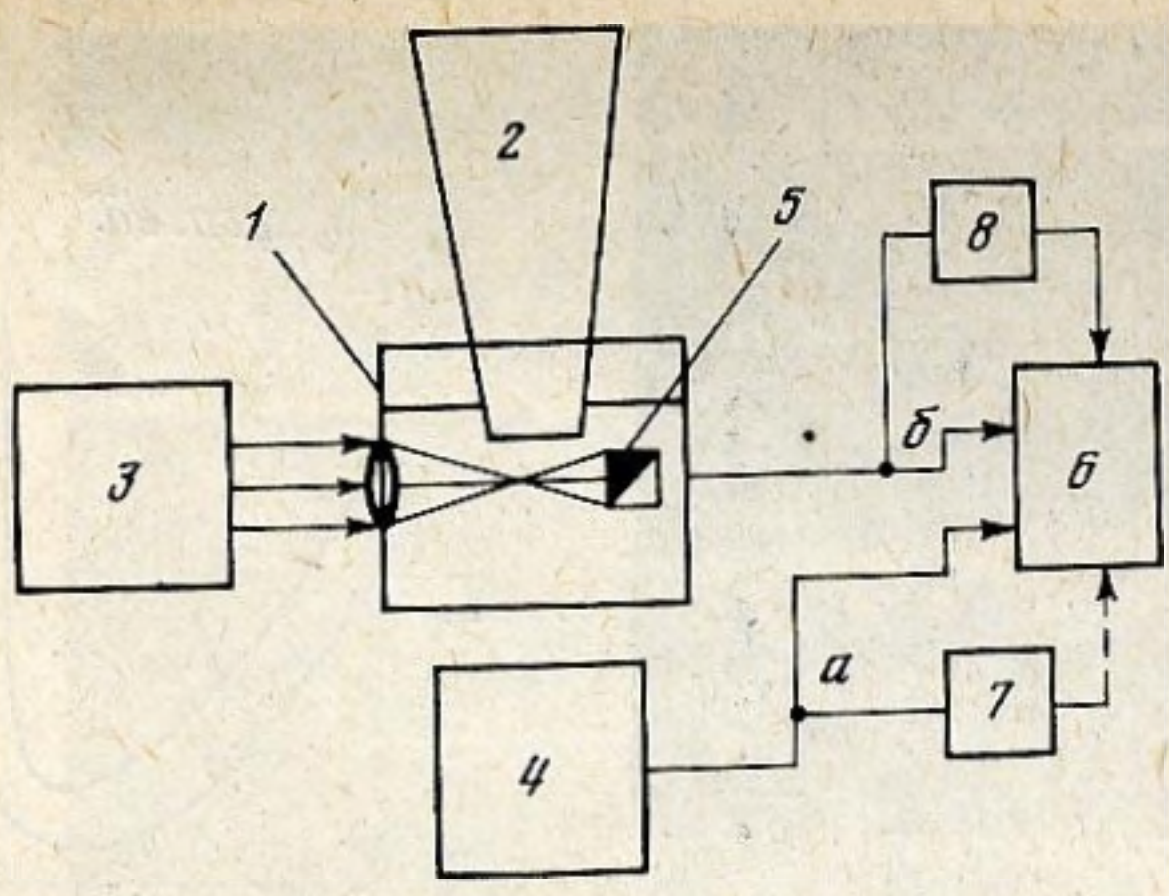
Интерес исследователей к жидкокристаллическому состоянию вещества связан с особенностью свойств этого состояния и, как следствие, с перспективой многочисленных применений в различных областях. К настоящему времени достаточно хорошо изучены оптические, магнитные, акустические и некоторые другие свойства жидких кристаллов [1—3]. Однако в печати, насколько это известно авторам, не появлялось сообщений об исследовании в жидких кристаллах кавитационных эффектов.

Цель настоящей работы — обнаружение и сопоставление особенностей протекания лазерной и ультразвуковой кавитации для изотропного и мезоморфного состояния в ряде жидкокристаллических систем. Существенным представлялось также выяснение возможности получения информации о точках фазовых переходов исследуемых систем по характеру температурной зависимости интенсивности вторичных эффектов (сонолюминесценция, кавитационный шум).

Эксперимент проводился следующим образом. Исследуемый жидкий кристалл (ЭББА и холестериловый эфир миристиновой кислоты), находящийся в термостатируемой кювете (см. фиг. 1) объемом 3 см^3, подвергался воздействию мощного ультразвука, вводимого в кювету с помощью излучателя *2*, или лазерного импульса от неодимового квантового генератора *3*.

Магнитострикционный ультразвуковой излучатель с рабочей площадью ~1 см^2 испускал ультразвуковые импульсы длительностью $3\cdot10^{-3}$ с и частотой заполнения ≈20 кГц. Мощность ультразвукового цуга была достаточна для образования кавитации в исследуемых системах в объеме ~0,5 см^3, непосредственно прилегающем к поверхности излучателя. Импульсное возбуждение было выбрано в связи с необходимостью термостатирования исследуемого вещества с точностью 1° С: в случае непрерывного режима поддержание столь малого рабочего объема (3 см^3) при заданной температуре затруднительно. Частота следования ультразвуковых импульсов могла изменяться в широких пределах, но в условиях эксперимента с учетом сказанного выше использовался режим запуска с частотой ~0,03 Гц.

Длительность импульсов неодимового лазера была $1{,}5\cdot10^{-8}$ с энергией 0,01 Дж. При инициировании кавитационных явлений лазерным излучением частота следования импульсов задавалась оператором и составляла



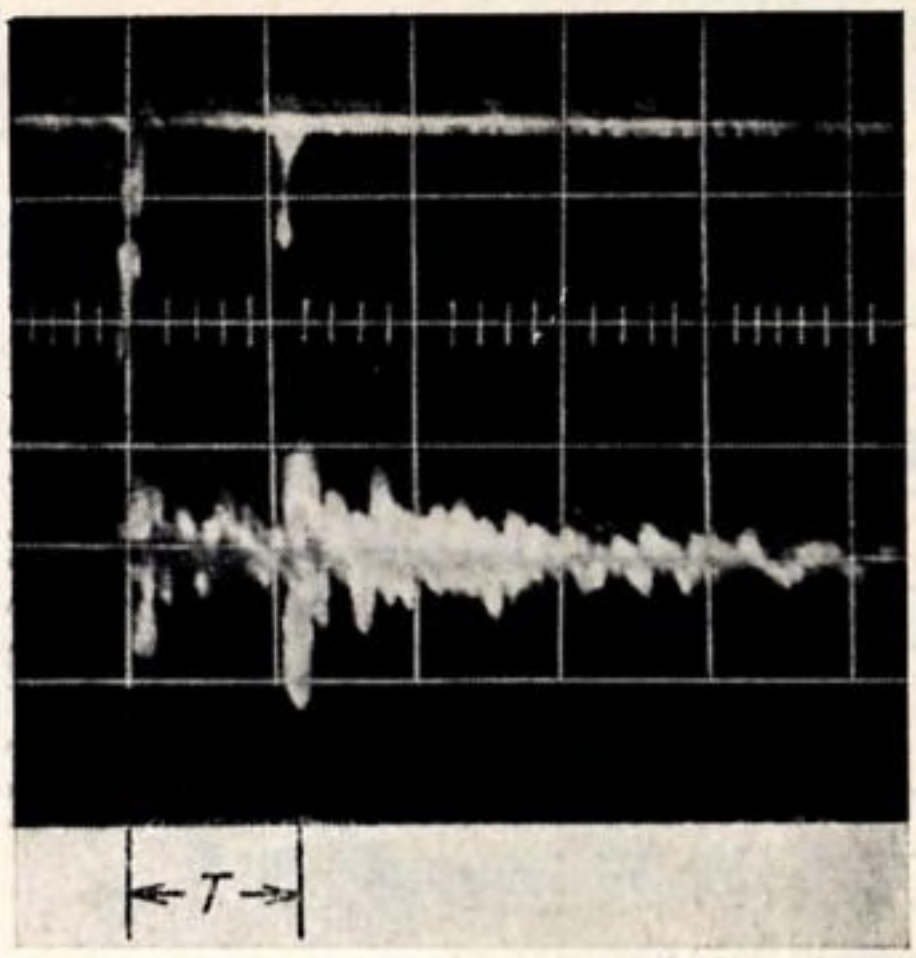
Фиг. 1. Блок-схема экспериментальной установки

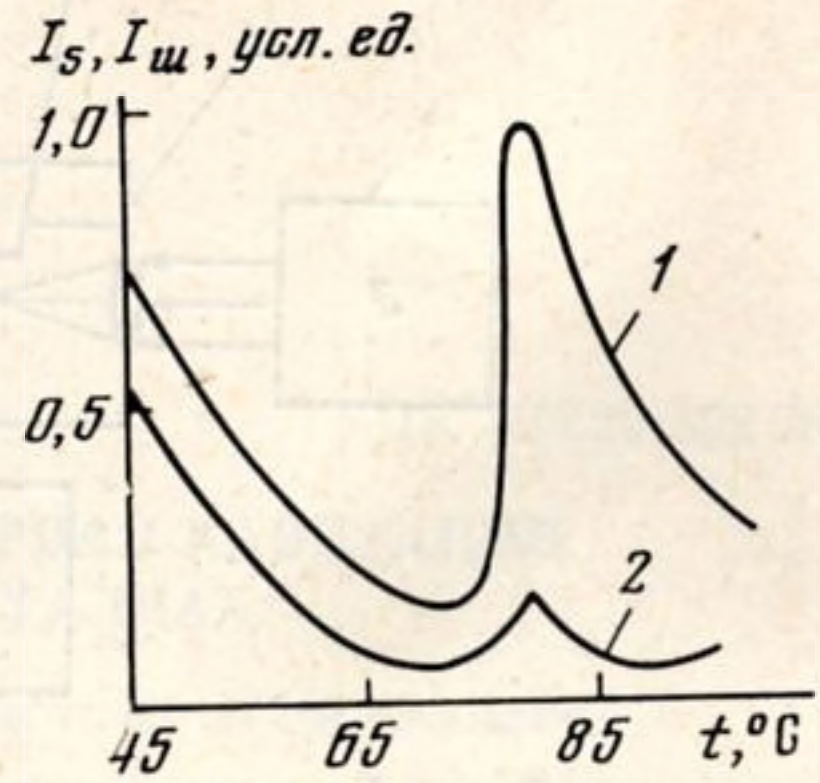
1—2 импульса в минуту. Мощность лазерного импульса составляла ~1 МВт, что при дополнительной фокусировке излучения с помощью короткофокусной линзы (фокусное расстояние $F=1{,}5$ см) было достаточным для искрового пробоя в центре кюветы. При этом на месте пробоя образовывалась кавитационная каверна размером $R_{max}\simeq 0{,}1-1$ мм с периодом пульсации T в несколько десятков микросекунд. Точная связь этих параметров дается известным выражением, приведенным, например, в [4].

Система регистрации возбуждения кавитации в обоих случаях была практически идентичной и включала в себя фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-13 (*4*), служивший для наблюдения за световыми явлениями, и широкополосный гидрофон *5* — для наблюдения акустических эффектов. Далее световые и акустические импульсы уже в виде электрических сигналов с выходов *а* и *б* подавались непосредственно на двухлучевой осциллограф с запоминающим устройством типа С8-2А (*6*). Типичные осциллограммы, характеризующие кавитационное событие, инициированное лазером, приведены на фиг. 2. Здесь на верхней осциллограмме первый импульс соответствует вспышке от пробоя, второй импульс — сонолюминесцентной вспышке при коллапсе каверны; на нижней осциллограмме видны коррелированные по времени со световыми акустические импульсы с гидрофона, соответствующие лазерному пробою и коллапсу каверны. Временной интервал между пробойными импульсами и импульсами при коллапсе и есть упомянутый выше период пульсаций каверны T.

При ультразвуковом возбуждении информация с выходов *а* и *б* выводилась на осциллограф после предварительного интегрирования с постоянной времени $\tau=5\cdot 10^{-3}$ с (интеграторы обозначены символами *7*, *8* на фиг. 1). Эта процедура была необходима в связи с дискретностью и периодичностью (с несущей частотой $f=20$ кГц) поступающей с регистрационных каналов информации.

В эксперименте использовался также комплект аппаратуры для измерения скорости и поглощения ультразвуковых волн на частоте 2 мГц (на фиг. 1 не показан), которая служила для определения точек фазовых переходов исследуемых жидкокристаллических систем. Оказалось, что точки фазовых переходов можно определить и по температурной зависимости ультразвуковой сонолюминесценции, характеризуемой величиной I_s, равной световому потоку, проинтегрированному за время, соответствующее полной длительности ультразвукового цуга, и по кавитационному шуму, характеризуемому величиной $I_ш$ — сигналом с гидрофона, принятым на частоте 150 кГц в полосе 4 кГц и проинтегрированным за время, равное полной длительности ультразвукового цуга. На фиг. 3 приведены температурные зависимости I_s и $I_ш$ для ЭББА. Аналогичные кривые были получены





Фиг. 2 Фиг. 3

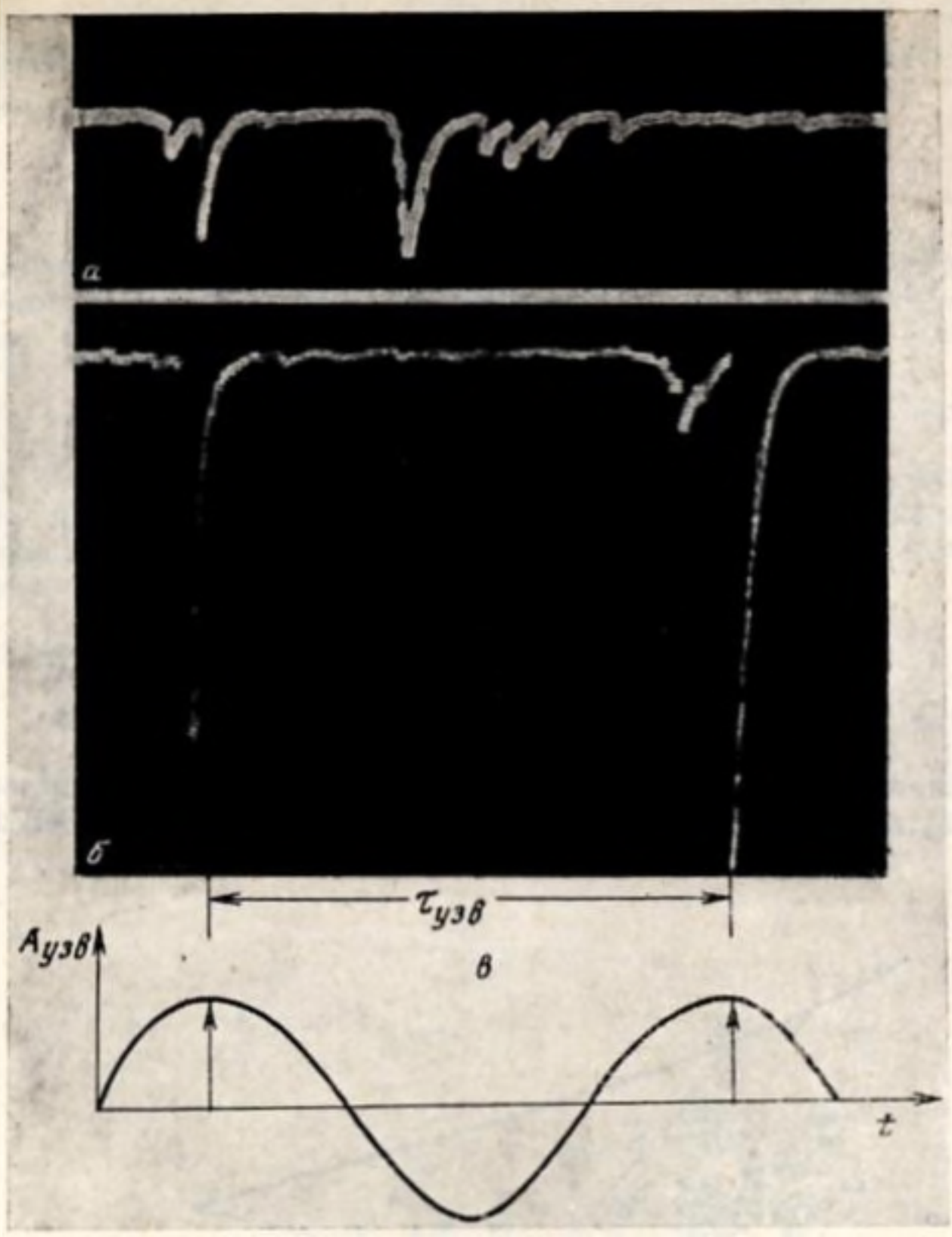
Фиг. 2. Световые (на верхнем луче) и ударно-акустические (нижний луч) импульсы, сопровождающие лазерный пробой (первые импульсы на развертке) и последующий коллапс образующейся каверны (вторые импульсы). Развертка — 50 мкс/дел

Фиг. 3. Температурные зависимости сонолюминесценции (кривая *1*) и кавитационного шума (кривая *2*) в кристаллах ЭББА при ультразвуковой кавитации

и для холестерилового эфира миристиновой кислоты, где также было отчетливо заметно резкое изменение I_s и $I_ш$ вблизи температур, соответствующих изотропно-холестерическому и холестерил-смектическому переходам. Совершенно очевидно, что полученные аномалии в поведении сонолюминесценции и кавитационного шума вблизи точки фазового перехода скорее всего обусловлены известными эффектами интенсивного светорассеяния и значительного изменения коэффициента поглощения ультразвука при переходе жидкого кристалла в мезоморфное состояние. Мы же обращаем здесь внимание только на тот факт, что для жидкокристаллических систем, находящихся в мощных ультразвуковых полях, можно с достаточно хорошей точностью и без привлечения дополнительных методик определять точки фазовых переходов по характеру температурных зависимостей I_s и $I_ш$ (причем независимо от причин, вызвавших их изменение).

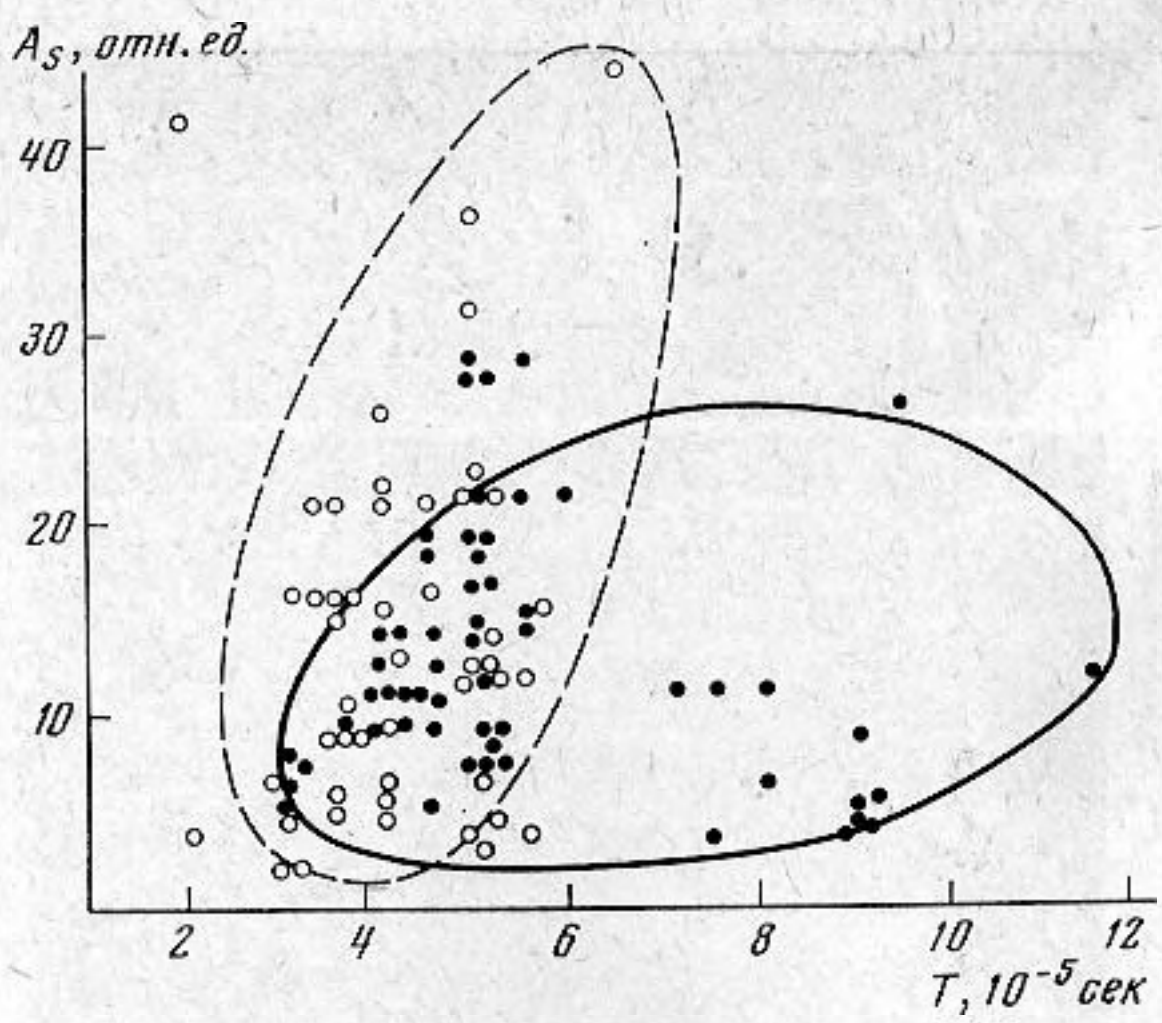
Особенностью протекания кавитационных явлений в жидких кристаллах при возбуждении ультразвуком можно, по-видимому, считать резко различающуюся временну́ю структуру сонолюминесцентного импульса в ЭББА (см. фиг. 4), находящемся в изотропном (t=90° С) и нематическом (t=78,5° С) состояниях. При этом мы имеем в виду структуру светового импульса в течение одного периода ($\tau_{узв}=5\cdot10^{-5}$ с) ультразвуковых колебаний, в определенной фазе которых, как известно [5], обычно происходят вспышки сонолюминесценции в изотропных жидкостях. Не исключено, что отсутствие для мезоморфного состояния строгого совпадения момента возникновения сонолюминесцентных импульсов с определенной фазой ультразвука обусловлено особенностями возникновения и динамики кавитационных пузырьков в мезофазе. Заметим, что при регистрации сонолюминесцентного импульса в пределах одного периода ультразвуковых колебаний величина RC выходных цепей фотоумножителя составляла 10^{-6} с, т. е. сигнал с ФЭУ поступал прямо на осциллограф, минуя интегратор *7*.

Температурную зависимость, аналогичную приведенной на фиг. 3, для случая инициирования кавитационных событий лазерным пробоем получить нелегко. Во-первых, сложна нормировка измеряемых параметров, так как от импульса к импульсу инициируются события с разными

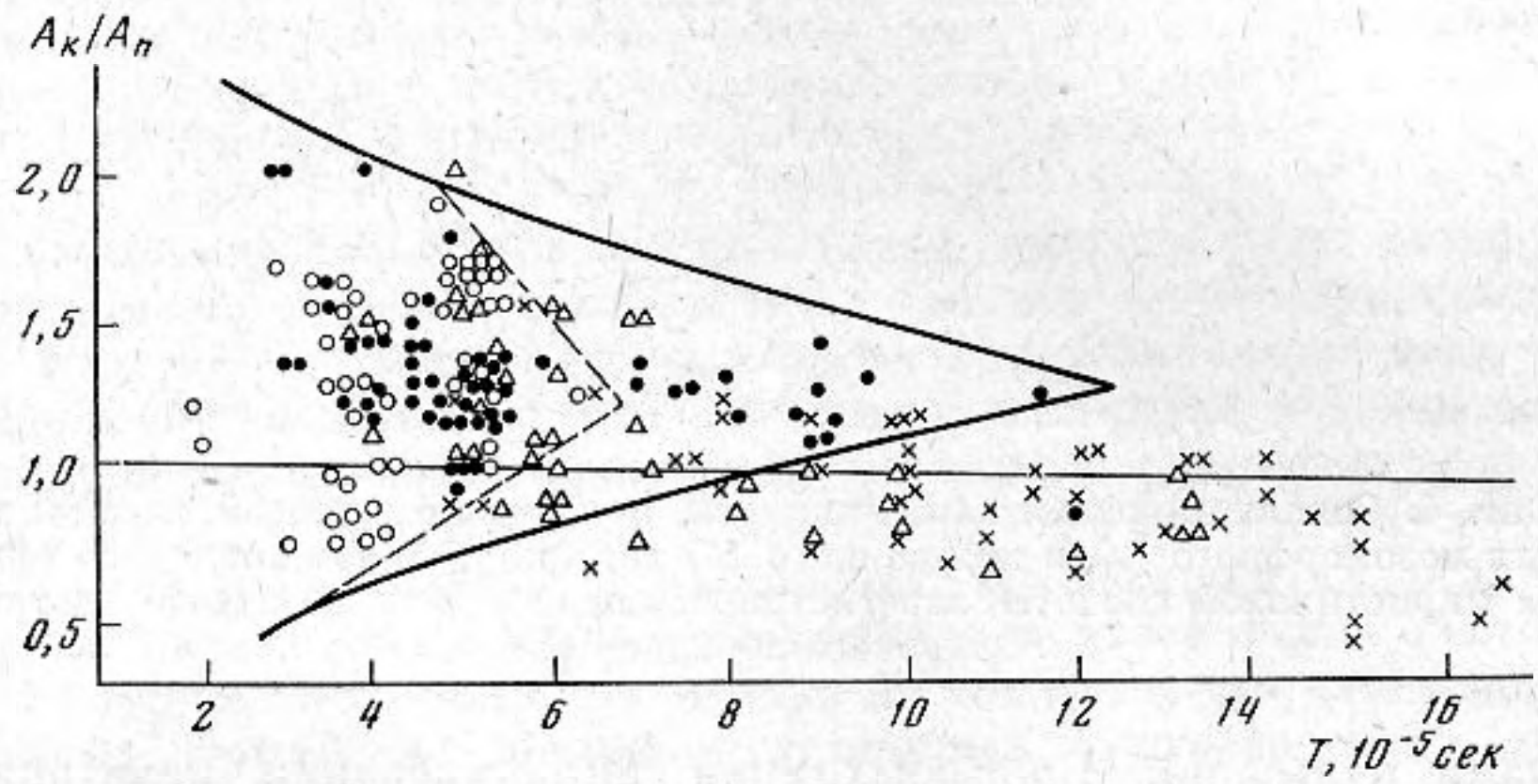


Фиг. 4. Сонолюминесцентные импульсы при ультразвуковой кавитации для мезоморфного (*а*) и изотропного (*б*) состояний холестерилового эфира миристиновой кислоты, зарегистрированные в течение одного ультразвукового периода (*в*)

периодами пульсаций. Во-вторых, при инициировании кавитационных событий посредством лазерного пробоя жидкий кристалл после нескольких сот импульсов протерпевает некоторые изменения, выражающиеся, по крайней мере, в небольшом сдвиге точек фазового перехода. В-третьих, большой разброс амплитуд сонолюминесцентных импульсов даже для событий с близкими периодами пульсаций, связанный, вероятно, с разной первоначальной формой образующихся каверн, требует длительного воздействия лазерного луча на образец. Вследствие этого мы вынуждены были ограничиться набором статистических данных только при двух температурах: при $t=78{,}5°$ С, соответствующей нематическому состоянию, и $t=90°$ С, соответствующей изотропному состоянию ЭББА. Результаты представлены на фиг. 5 и 6. При этом нормирование измеряемых параметров — амплитуд импульсов лазерной сонолюминесценции $A_л$ (фиг. 5) — и отношения амплитуд акустических импульсов при коллапсе и при пробое $A_к/A_п$ (фиг. 6) произведено на период пульсаций T, связанный, как уже указывалось, с максимальным размером кавитационной каверны. Обозначения на фиг. 6 следующие: крестики и треугольники — события в ЭББА соответственно при $t=78{,}5°$ С (нематическое состояние) и $t=90°$ С (изотропное состояние), не сопровождающиеся сонолюминесцентным импульсом, несмотря на наличие пульсирующей каверны (т. е. события типа, представленного на фиг. 2, однако второй световой импульс на верхней осциллограмме при этом отсутствует); темными и светлыми кружками (так же, как и на фиг. 5) обозначены события соответственно при $t=78{,}5°$ С (нематическое состояние) и $t=90°$ С (изотропная жидкость),



Фиг. 5. Зависимость амплитуды сонолюминесцентных импульсов A_s от периода пульсаций каверны T при лазерной кавитации в ЭББА в функции T



Фиг. 6. Зависимость отношения амплитуд ударно-акустических импульсов при коллапсе и при лазерном инициировании неоднородности $A_к/A_п$ от периода пульсаций каверны T при лазерной кавитации в ЭББА

сопровождающиеся сонолюминесцентным импульсом (полное соответствие фиг. 2).

На фиг. 5 и 6 пунктиром и сплошными линиями ограничена область значений $A_к/A_п$ и A_s для событий, сопровождающихся сонолюминесцентной вспышкой соответственно при $t=78{,}5°$ С и $90°$ С. Обращает на себя внимание отсутствие сонолюминесцентных вспышек в кристалле ЭББА, находящемся в изотропном состоянии (т. е. при $t=90°$ С), для событий с периодами пульсаций $T \geqslant 6 \cdot 10^{-5}$ с. При этом в жидкокристаллической фазе ($t=78{,}5°$ С) световые вспышки возникают вплоть до значений $T=12 \cdot 10^{-5}$ с, что, вероятнее всего, связано с более резким режимом захлопывания (большее значение $A_к/A_п$ на фиг. 6) каверны на конечных стадиях коллапса. Что этому способствует в случае, когда исследуемый объект находится в нематическом состоянии, а не в виде изотропной жидкости, пока не ясно; этот вопрос может, по-видимому, явиться темой специальных исследований.

В заключение укажем, что отмеченные в настоящей работе особенности коллапса в жидкокристаллических системах гетерофазных неоднородностей, инициированных мощным ультразвуком или лазерным излучением, представляют интерес как с точки зрения более детального изучения

обнаруженных кавитационных явлений, так и в связи с исследованиями некоторых свойств жидких кристаллов, включая проблему фазовых переходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bertolotti M., Scudieri F., Sette D., Bartolino K.* Electric and optic behavior of a lighed samples of nematic liquid crystals. J. Appl. Phys., 1972, *43*, 10, 3914–3916.
2. *Stephen Michael G., Straley Joseph P.* Physics of liquid crystals. Revs. Mod., Phys., 1974, *46*, 4, 617–704.
3. *Wetsel Grover C.* Ultrasonic-wave propagation in nematic liquid crystals. Ultrason. Symp. Proc. Boston, 1972, 4, 1972, 453–460.
4. *Наугольных К. А., Рой Н. А.* Электрический разряд в воде. М., «Наука», 1977.
5. *Голубничий П. И., Гончаров В. Д., Протопопов Х. В.* Сонолюминесценция в жидкостях. Влияние растворенных газов, отступления от тепловой теории. Акуст. ж., 1969, *15*, 1, 534–542.

Ворошиловградский машиностроительный институт

Поступила 5 октября 1977 г.
После повторного исправления 17 апреля 1979 г.