

УДК 534.222.2

## ОБ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ В РАСПЛАВАХ

О. В. Абрамов, Ю. С. Асташкин, В. С. Степанов

Рассмотрены процессы формирования и развития акустических течений при введении колебаний частотой 45 и 139 кГц в расплав прозрачного органического вещества, имитирующего металлы. Медленные акустические течения масштаба длины волны возникают в переохлажденном расплаве в том случае, когда в жидкости имеет место кавитация, сопровождающаяся образованием частиц твердой фазы.

Характер образующихся течений и особенности их взаимодействия с конвективными потоками в кристаллизующемся расплаве определяются параметрами ультразвукового поля, составом сплава и условиями его кристаллизации. При превышении амплитудой колебательной скорости определенного уровня, характерного для данного состава сплава, скорость акустических течений в 5—10 раз превышает скорость конвективных потоков.

Распространение ультразвука высокой интенсивности в жидкой фазе затвердевающего расплава приводит к возникновению нелинейных эффектов, таких, как акустические течения, кавитация и др. Кавитации и ее роли в процессах зарождения центров твердой фазы и диспергирования растущих кристаллов посвящен ряд экспериментальных и теоретических исследований [1—3]. Вместе с тем работ, освещающих развитие акустических течений в жидкой фазе затвердевающего слитка и их роль в процессах формирования его структуры, практически нет. Известно, однако, что перемешивание расплава изменяет кинетику кристаллизации и структуру формирующегося слитка. С этой точки зрения представляет интерес возможность интенсификации перемешивания, причиной которого в ультразвуковом поле могут быть акустические течения. Экспериментальное исследование характера и геометрии акустических течений может быть затруднено наличием кавитации, в связи с чем целесообразно наложить ограничения на степень ее развития путем выбора для исследований определенного частотного диапазона.

В данной работе акустические течения изучались в расплавах прозрачного органического вещества в частотном диапазоне 100—250 кГц. Для выявления особенностей течений при введении колебаний более низких частот ряд экспериментов проводился на частоте 45 кГц. При выборе вещества мы руководствовались соображениями его подобия по физико-химическим характеристикам расплавам металлов, для которых параметр  $\alpha = L_{пл}/RT_0$ , где  $L_{пл}$  — молярная теплота плавления,  $R$  — газовая постоянная,  $T_0$  — температура плавления, отвечает условию  $\alpha < 2$  [4]. Кроме того, учитывалась возможность надежного наблюдения акустических течений. В качестве такого модельного вещества были выбраны сплавы системы нафталин — камфора, кристаллизующиеся по диаграмме эвтектического типа. У камфоры  $\alpha \sim 2$ , у нафталина  $\alpha \sim 6,5$ , у неметаллоподобных органических соединений параметр  $\alpha$  обычно составляет 8—16.

Исходные вещества (нафталин и камфора) подвергались многократной кристаллизационной очистке: чистота расплава весьма важна как для повышения его кавитационной прочности, так и для обеспечения



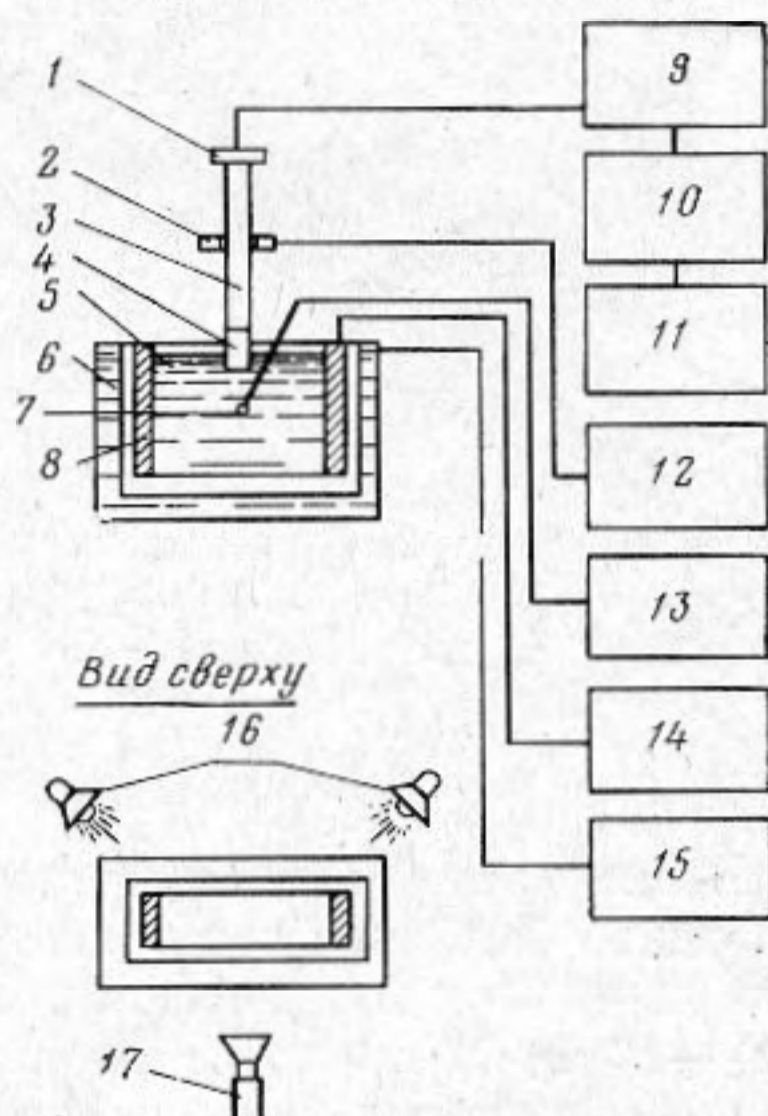
возможности переохлаждения системы. Степень очистки считалась достаточной, если, с одной стороны, расплавы обладали способностью к переохлаждению, характеризуемой условием  $\Delta T = 4-5^\circ \text{C}$  ( $\Delta T = T_0 - T$ , где  $T_0$  — равновесная температура кристаллизации,  $T$  — реальная температура начала кристаллизации), а с другой, если амплитуда давления на пороге кавитации  $p_{mk}$  при озвучивании расплава превышала 0,1 атм.

Эксперименты проводились на установке, схематически изображенной на фиг. 1. Прозрачная кювета с расплавом 5 размером  $70 \times 18 \times 60$  мм помещалась в водяную баню 6, соединенную с термостатом 15. Расплавление исследуемого вещества осуществлялось при подаче в баню воды с температурой, превышающей температуру ликвидус сплава  $T_L$ . Для направленного охлаждения расплава использовались два холодильника 8, установленные с боковых торцов кюветы и соединенные со вторым термостатом 14. Температура воды в термостатах поддерживалась с точностью до  $0,1^\circ \text{C}$ . Ультразвук вводился в расплав с помощью стержневого излучателя из плавленого кварца 4, соединенного с преобразователем 1 посредством звукопровода 3 из титанового сплава. При этом на частоте 45 кгц использовался магнотриксционный преобразователь из пермендюра, а на частотах 100—250 кгц — преобразователь 1 из керамики ЦТС-19. Питание преобразователей осуществлялось от широкодиапазонного генератора 9 мощностью порядка 10 вт. Частота возбуждения измерялась цифровым частотомером 10, напряжение — электронным вольтметром 11. Амплитуда колебательного смещения на излучающем стержне определялась с помощью электродинамического датчика 2, соединенного с электронным вольтметром 12 [5]. Звуковое давление в расплаве измерялось миниатюрным сферическим гидрофоном 7 с вольтметром 13; чувствительность гидрофона была около  $0,6 \text{ мкв/дн} \cdot \text{см}^{-2}$  в интервале частот 0—350 кгц.

Скорость и масштаб течений определялись с помощью фото- и кинограмм. Съёмки производились при освещении кюветы двумя источниками света 16. Микропотоки вблизи излучателя и фронта кристаллизации снимались в поляризованном свете с использованием микроскопа 17.

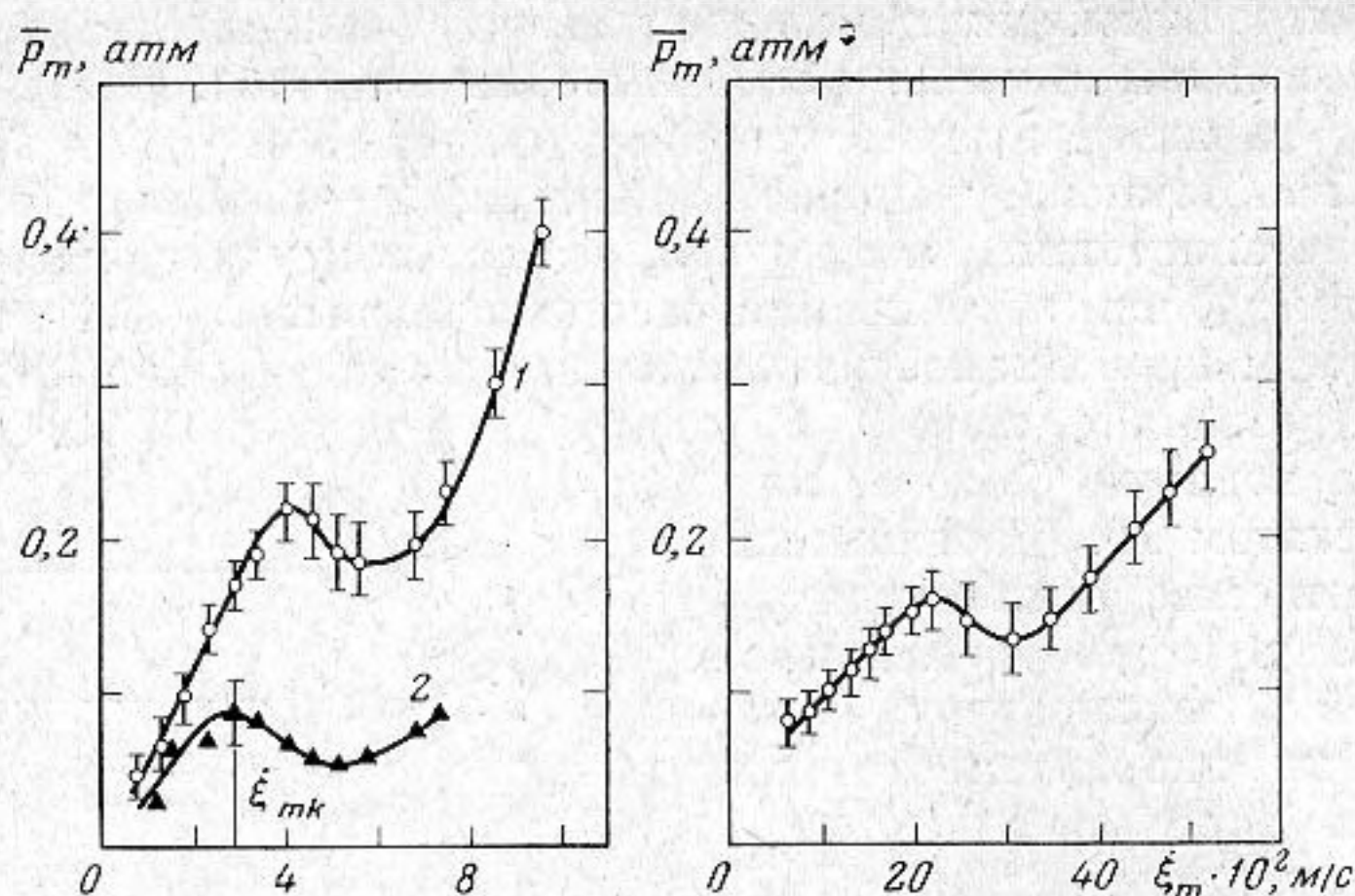
В предварительных экспериментах были исследованы особенности кристаллизации сплавов выбранной системы различного состава, для исследования характера развития акустических потоков и кавитации был выбран сплав с 39% нафталина и 65% камфоры ( $\alpha \sim 3,5$ ), у которого наиболее четко выявлялась картина течений. В предварительных экспериментах было установлено, кроме того, что развитие кавитации и акустических течений проходит практически одинаково в диапазоне частот 100—250 кгц и на частоте 45 кгц.

Как показали эксперименты, в исследуемых расплавах в ультразвуковом поле возникают течения различного характера. Основными факторами, определяющими природу, скорость и масштаб течений, являются интенсивность ультразвука и температура расплава, от которой фактически зависит вязкость последнего. Кроме того, характер акустических течений существенно зависит от того, где они локализованы — в «свободной» (перегретой или переохлажденной) жидкой фазе или вблизи фронта кристаллизации.



Фиг. 1. Схема установки для исследования акустических течений в переохлажденных расплавах





Фиг. 2. Зависимость амплитуды звукового давления  $\bar{p}_m$  в расплаве от амплитуды колебательной скорости излучателя  $\xi_m$  на частоте: а — 139 кГц (кривая 1 —  $\Delta T = 4^\circ \text{C}$ , кривая 2 —  $T - T_L = 5^\circ \text{C}$ ); б — 45 кГц ( $\Delta T = 4^\circ \text{C}$ )

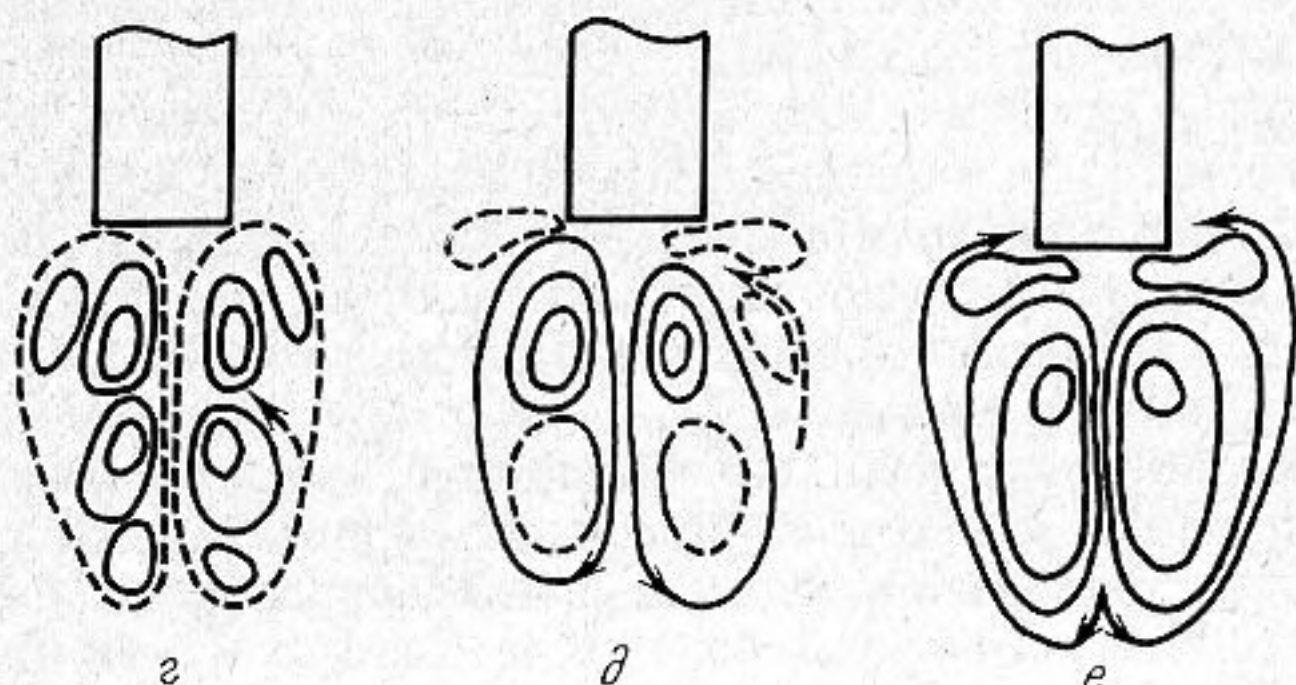
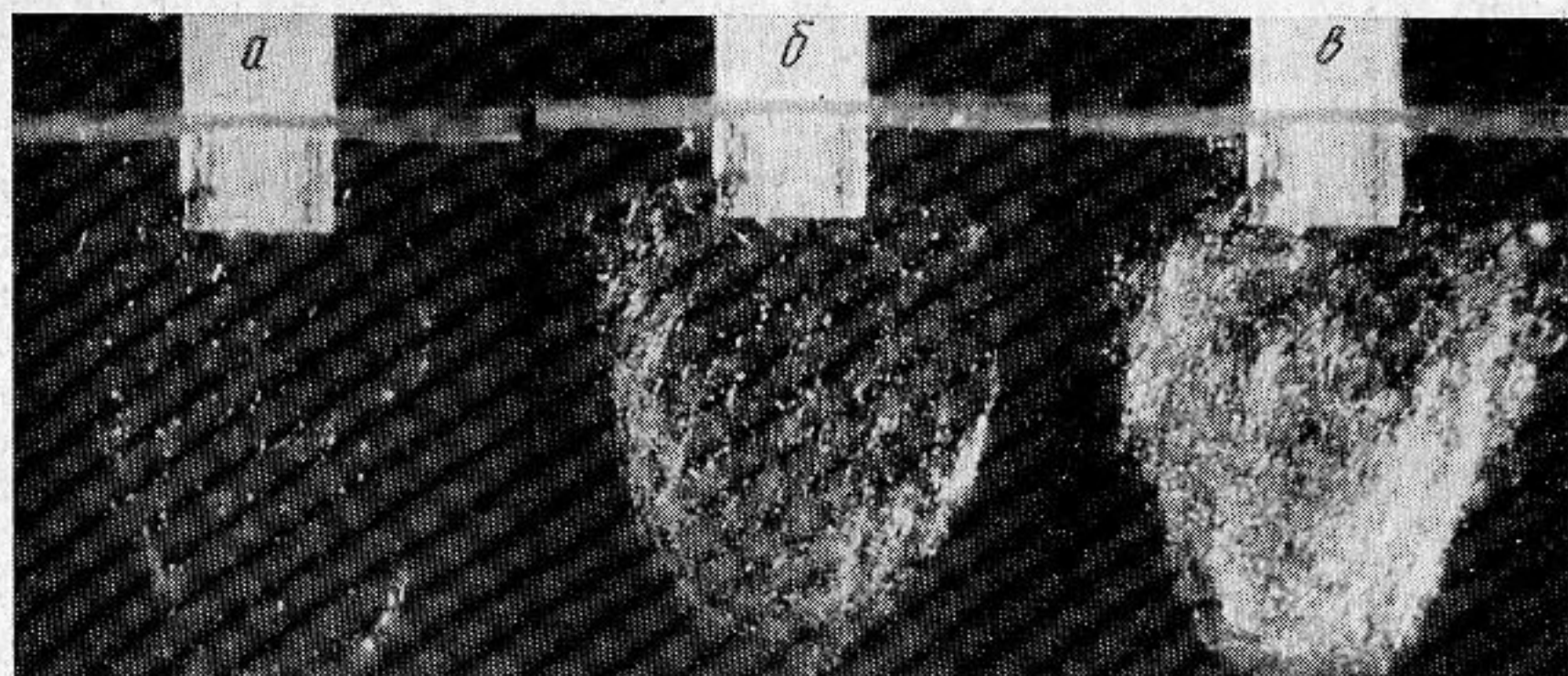
В силу этого анализ процессов развития акустических течений целесообразно было провести для трех ситуаций: потоки в перегретой жидкости ( $T - T_L \geq 5^\circ \text{C}$ ); потоки в переохлажденной жидкости ( $T < T_0$ ;  $\Delta T = T_L - T > 2^\circ \text{C}$ ) в отсутствие фронта кристаллизации; потоки в переохлажденной жидкости при наличии фронта кристаллизации. Результаты экспериментов по наблюдению акустических течений мы относили к колебательной скорости на поверхности излучателя  $\xi_m$  и к условной амплитуде звукового давления  $\bar{p}_m$ , полученной усреднением данных измерений звукового давления гидрофоном в нескольких удаленных от излучателя точках ультразвукового поля, находящихся вблизи границы области интенсивного перемешивания.

Зависимость величины  $\bar{p}_m$  от  $\xi_m$  в переохлажденном расплаве и в перегретой жидкости была качественно одинаковой (фиг. 2): в докавитационном режиме она имела линейный характер; возникновение и развитие кавитации при увеличении амплитуды колебательной скорости выше порогового значения  $\xi_{mk}$  приводило сначала к падению амплитуды  $\bar{p}_m$ , а затем вновь к ее увеличению, что качественно соответствует результатам подобных измерений в воде [6]. Следует отметить, что кривые  $\bar{p}_m(\xi_m)$  для переохлажденной жидкости проходят на фиг. 2 выше кривых для перегретой, что свидетельствует о более высоком удельном акустическом сопротивлении в первом случае.

В перегретом расплаве при низких интенсивностях ультразвука движение жидкости в виде акустических течений не наблюдалось. Это, по-видимому, связано с низкой вязкостью расплава ( $\sim 0,015 \text{ пз}$ ) и незначительным поглощением звука на используемых частотах. Можно высказать предположение, что в этих условиях не удавалось достичь порога возникновения течений вне пограничного слоя.

Введение в переохлажденный расплав в течение нескольких секунд ультразвуковых колебаний с частотой 139 кГц и с амплитудой колебательной скорости, превышающей порог кавитации, вызывало появление в окрестностях кавитационных пузырьков центров кристаллизации. Дальнейшее воздействие ультразвука на переохлажденный расплав приводило к некоторому увеличению содержания твердой фазы. После обработки расплава в течение времени свыше 10 сек в зоне, охваченной движением пузырьков и кристалликов, наблюдалось возникновение и развитие акустических течений (фиг. 3, а, б, в). Анализ движения отдельных





Фиг. 3. Фотографии с увеличением 1,5 (а, б, в) и схемы (г, д, е) развития акустических течений в переохлажденном расплаве ( $\Delta T = 4^\circ \text{C}$ ) через 10 (а, г), 20 (б, д) и 30 сек (в, е) после включения ультразвука с частотой 139 кГц при амплитуде колебательной скорости излучателя 5 см/сек

кристалликов по кинограммам позволил выявить изменение структуры течений со временем воздействия ультразвука. В случае, когда содержание твердой фазы сравнительно невелико (фиг. 3, а, г), доминируют течения с масштабом  $L \sim \lambda$  ( $\lambda$  — длина волны в расплаве), но появляются более крупные объединяющие потоки с масштабом  $L \sim (2,5 - 3)\lambda$ . Увеличение количества твердой фазы (фиг. 3, б, д) характеризуется подавлением течений с масштабом  $L \sim \lambda$  и интенсивным развитием более крупномасштабных потоков. Наконец, в случае значительного содержания твердой фазы (фиг. 3, в, е) потоки с масштабом  $L > \lambda$  доминируют и дополнительно появляются течения вблизи излучателя.

Отвлекаясь от механизма зародышеобразования и роста кристаллической фазы в окрестностях кавитационного пузырька, поскольку обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной работы, можно предположить, что при возникновении в расплаве частиц твердой фазы происходит существенное увеличение эффективной вязкости системы. Обусловленное этим поглощение звука, по-видимому, и вызывает появление акустических течений.

На низких ультразвуковых частотах (45 кГц) механизм развития и установления течений был принципиально таким же, как и на частотах 100—250 кГц. Анализ фотокинограмм в этом случае показывает, что время установления течений в масштабе кюветы составляет около 20—30 сек.

Результаты измерения скорости акустических течений в зависимости от амплитуды звукового давления и колебательной скорости приведены на фиг. 4, а, б, в. Измерение скорости потоков проводилось по анализу фотокинограмм, полученных после обработки расплава ультразвуком



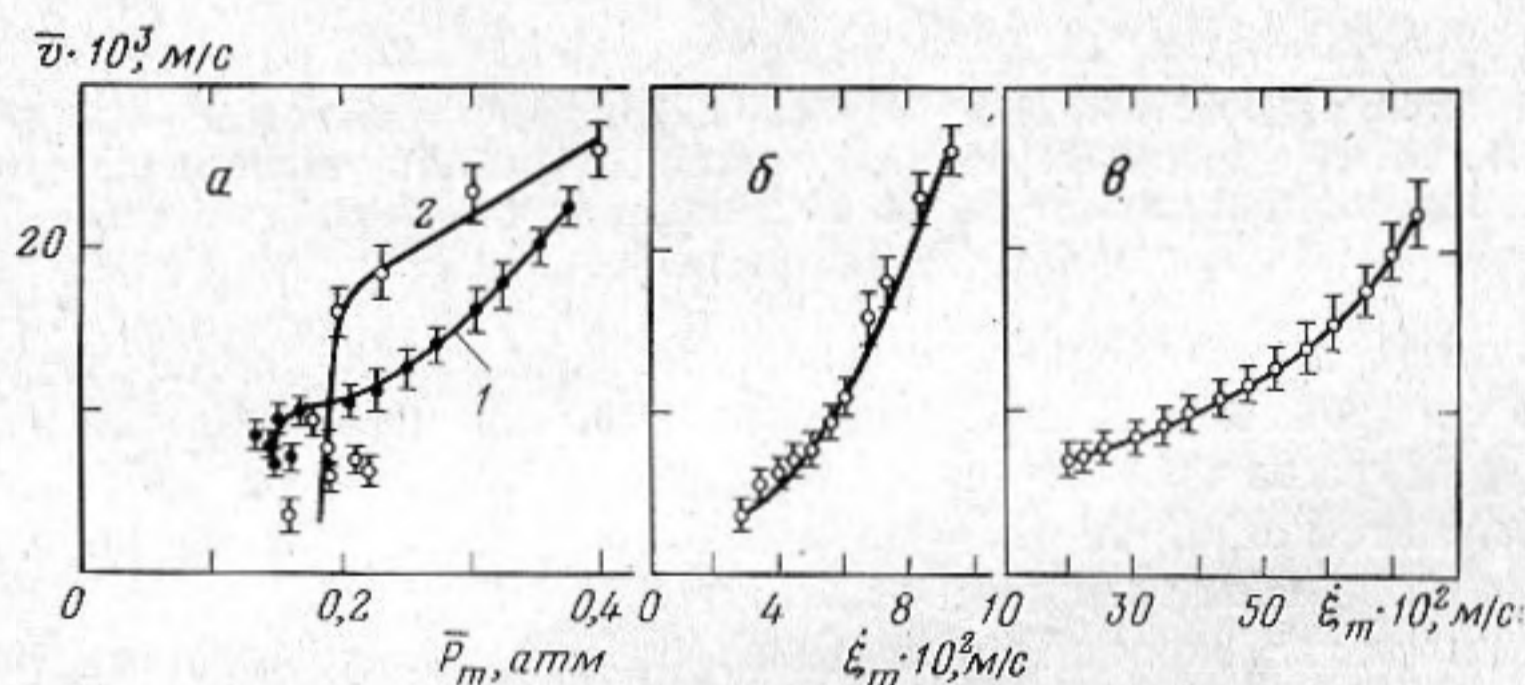
в течение 10—20 сек, т. е. промежутка времени, за который в расплаве успевают сформироваться акустические течения.

Оценки максимальной скорости течений  $v_{\max}$ , масштаба их  $L$ , акустического числа Маха  $M = \xi_m / c_L$  ( $c_L$  — скорость звука в расплаве), отношения скорости течений к колебательной  $v_{\max} / \xi_m$ , приведенные ниже для частот 45 и 139 кгц, позволили сделать вывод, что в рассматриваемых случаях реализовались медленные течения с масштабом  $L > \lambda$  [7]:

Частота, кгц	45	139
$v_{\max}$ , см/сек	2,3	2,8
$L/\lambda$	1—2	2,5—5
$M$	$3 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$
$v_{\max} / \xi_m$	0,03	0,3

Полученные результаты, в частности значения  $v_{\max}$  для частоты возбуждения 139 кгц, качественно соответствуют аналогичным данным, полученным для других жидкостей [8]. Анализ зависимости скорости течений  $v$  от амплитуды давления показывает, что акустические течения стабильно существуют в расплаве, начиная от некоторых пороговых амплитуд давления  $\bar{p}_{mT}$ . Сопоставление величины  $\bar{p}_{mT}$  с пороговым давлением, при котором появляются кавитационные пузырьки и центры кристаллизации, показывает, что они совпадают в пределах погрешности измерения. Эти пороговые давления на частоте 45 кгц ниже, чем на частоте 139 кгц (фиг. 4, а, кривые 1, 2).

Анализ особенностей возникновения акустических течений в переохлажденной жидкости при наличии фронта кристаллизации целесообразно провести для двух возможных ситуаций: фронт кристаллизации находится на значительном расстоянии  $l$  от излучателя ( $l \gg \lambda$ ) и вблизи излу-



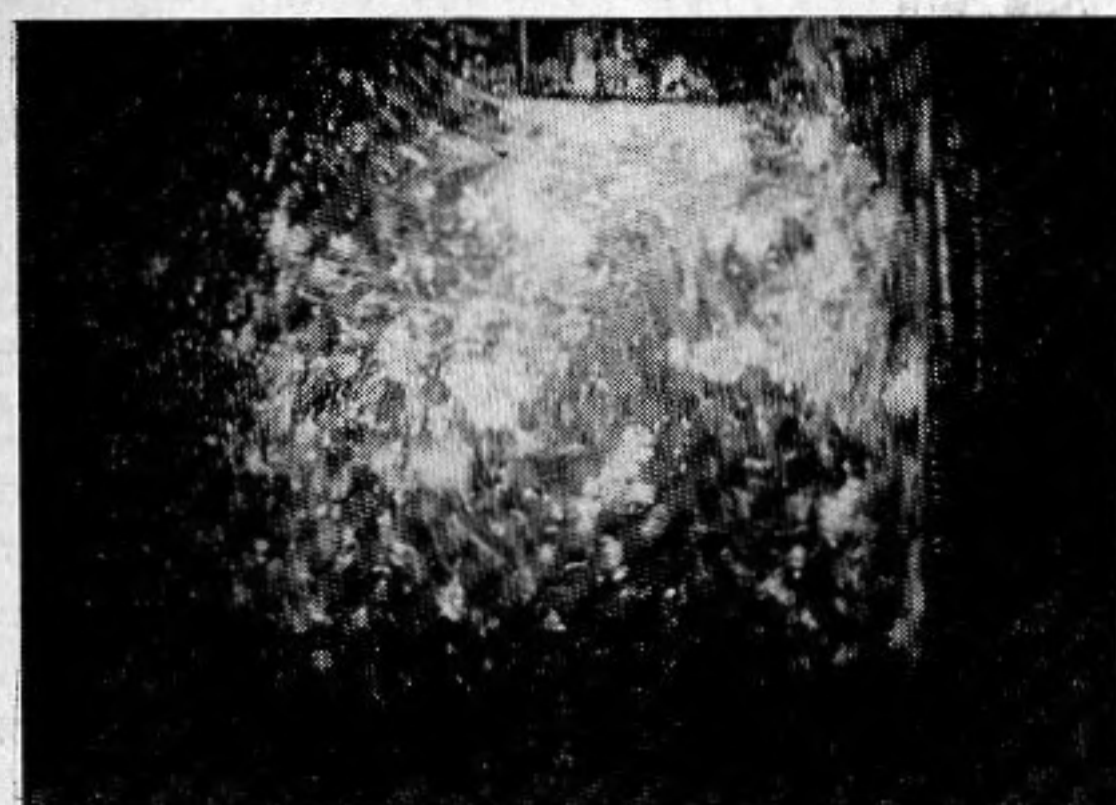
Фиг. 4. Зависимость скорости акустических потоков  $v$  в переохлажденном расплаве ( $\Delta T = 4^\circ \text{C}$ ) от амплитуды звукового давления  $\bar{p}_m$  (а — кривая 1 — частота 45 кгц, 2 — 139 кгц) и амплитуды колебательной скорости  $\xi_m$  (б — частота 139 кгц, в — 45 кгц)

чателя ( $l \leq \lambda$ ). В последнем случае процесс формирования течений может быть различен при кристаллизации сплава с узкой ( $\Delta l < \lambda$ ) и широкой ( $\Delta l \sim \lambda$ ) двухфазными зонами (здесь  $\Delta l$  — ширина двухфазной зоны).

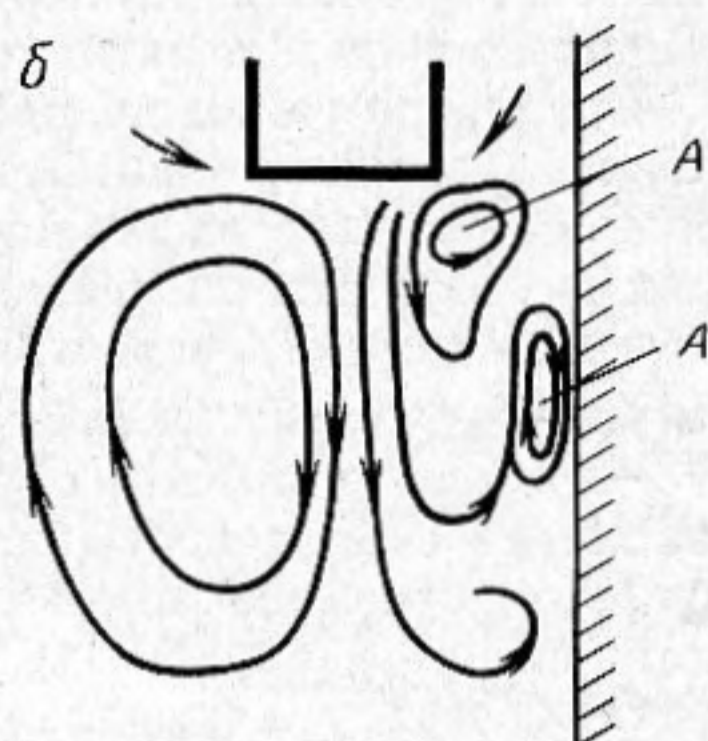
При проведении экспериментов создавался такой теплоотвод, чтобы скорость перемещения фронта кристаллизации была незначительной ( $< 0,005$  см/сек). В отсутствие ультразвукового поля в расплаве и, в частности, вблизи фронта кристаллизации имело место конвективное движение жидкости. При введении ультразвуковых колебаний в случае достаточной удаленности фронта от излучателя ( $l \gg \lambda$ ) процесс установления течений протекал в той же последовательности, как и в случае «свободной» переохлажденной жидкости. Когда фронт кристаллизации находился в непосредственной близости от излучателя, начальный период процесса формирования был аналогичен описанному выше: при превы-



шении порога кавитации в пучностях давления и у фронта кристаллизации возникали кавитационные пузырьки. При незначительной ширине двухфазной зоны ( $\Delta l \sim 0,1 \text{ см} \ll \lambda$ ) возникновение кавитационных пузырьков сопровождалось появлением частиц твердой фазы. В связи с тем что



a

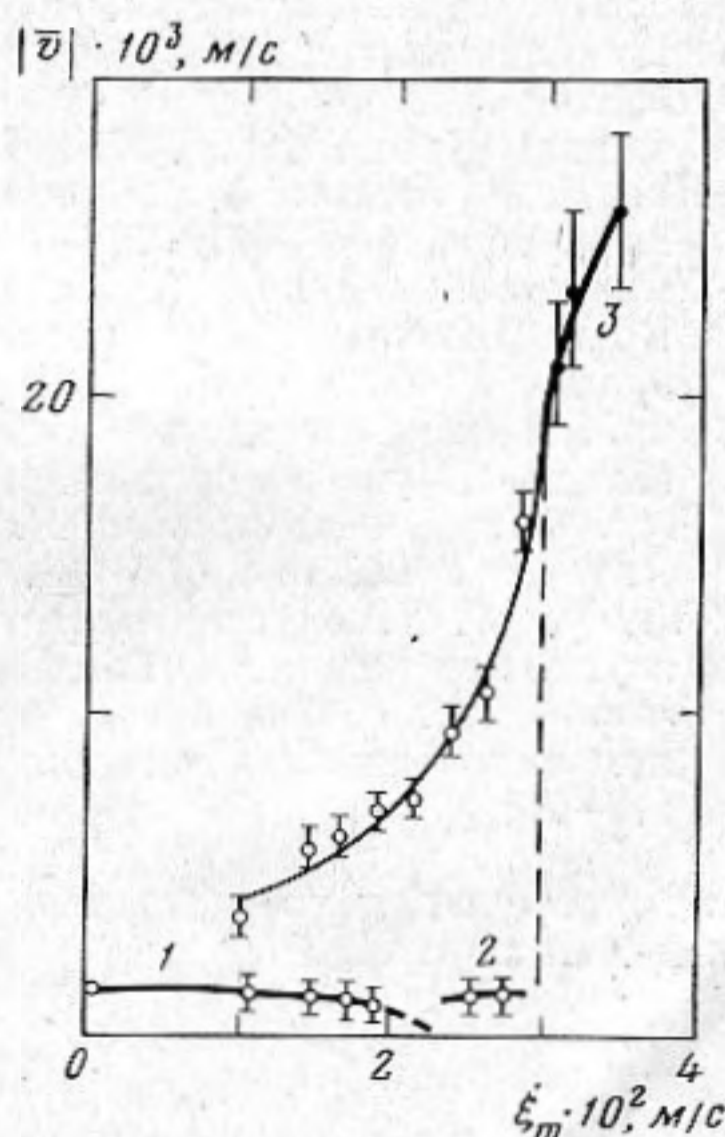


$$\xi_m = 2,1 - 2,3 \text{ см/с}$$

Фиг. 5. Фотография (a) и схема (б) развития акустических течений в кристаллизующемся расплаве под действием ультразвука с частотой 139 кгц

возникающие частицы находятся в области термического или концентрационного переохлаждения (вблизи фронта кристаллизации), происходит рост кристаллов из возникающих центров. В конечном счете в расплаве устанавливались как течения с масштабом  $L \sim \lambda$ , так и системы вихрей сравнительно малого масштаба непосредственно вблизи фронта кристаллизации (фиг. 5; малые вихри отмечены буквой А). В случае широкой двухфазной зоны ( $\Delta l \sim 0,4 \text{ см}$ ) возникновение кавитационных пузырьков сопровождалось процессами диспергирования растущих кристаллов. Через 7—10 сек после включения колебаний в расплаве вблизи фронта кристаллизации устанавливались течения с масштабом  $L \sim \lambda$ .

Как показали эксперименты, характер образующихся течений и особенности их взаимодействия с конвективными потоками определяются параметрами ультразвукового поля и составом сплава (направлением конвективных потоков, их скоростью, а также шириной двухфазной зоны). На фиг. 6 приведены для примера зависимости скорости конвективного и акустических с масштабом  $L < \lambda$  (кривая 2) и масштабом  $L \sim \lambda$  (кривая 3) течений от амплитуды колебательной скорости. Приведенные кривые относятся к экспериментам на частоте 139 кгц при расположении плоского фронта кристаллизации ( $\Delta l \ll \lambda$ ) на расстоянии  $l \sim \lambda$  от излучателя. С увеличением амплитуды  $\xi_m$  скорость конвективного движения (кривая 1) монотонно падает вплоть до исчезновения этого движения при  $\xi_m = 2,2 - 2,5 \text{ см/сек}$ . Скорость вихрей сравнительно мелкого масштаба,



Фиг. 6. Зависимость скорости конвективных (кривая 1) и акустических с масштабом  $L < \lambda$  (кривая 2) и масштабом  $L \sim \lambda$  (кривая 3) течений от амплитуды колебательной скорости



возникающих у фронта, была того же порядка, что и скорость конвективных потоков (кривая 2), скорость среднемасштабных течений при  $\xi_m < 3$  см/сек несколько превышала скорость конвективного движения (часть кривой 3 со светлыми кружками). Повышение амплитуды колебательной скорости свыше 3 см/сек приводило к интенсивному взаимодействию акустического и конвективного движения, при этом скорость жидкости в направлении конвективного движения возрастала на порядок.

Анализ результатов, полученных при других условиях эксперимента (противоположное направление конвективных потоков, изрезанный фронт, различное расстояние от излучателя до фронта), показал, что во всех случаях при малой амплитуде колебаний взаимодействие между акустическими и конвективными потоками не имеет места. Повышение амплитуды колебательной скорости свыше определенного уровня ( $\xi_m = 3-8$  см/сек в зависимости от состава сплава) приводит к интенсивному взаимодействию течений; скорость установившегося движения жидкости при этом существенно (в 5-10 раз) превышает скорость конвективных потоков.

Образование в расплаве течений относительно крупного масштаба вызывает выравнивание температуры в объеме жидкости и развитие процессов переноса мелкодисперсных частиц твердой фазы — зарождающихся центров кристаллизации и диспергированных кристаллов. Увеличение количества мелкодисперсной фазы и перенос этих частиц акустическими потоками приводит к образованию более однородной мелкозернистой структуры затвердевающего слитка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О. В., Теумин И. И.* Кристаллизация металлов. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука, под ред. Л. Д. Розенберга, т. 3. М., «Наука», 1970, 429-514.
2. *Hickling R.* Nucleation of freezing by cavity collapse and its relation to cavitation damage. *Nature*, 1965, 206, 4987, 915-917.
3. *Hunt J. D., Jackson K. A.* Nucleation of solid in an undercooled liquid by cavitation. *Appl. Phys.*, 1966, 37, 1, 256-257.
4. *Джексон К., Ульман Д., Хант Дж.* О механизме роста кристаллов из расплава. В кн.: Проблемы роста кристаллов. М., «Мир», 1968, 27-86.
5. *Абрамов О. В., Асташкин Ю. С.* Бесконтактное измерение колебательных смещений. В сб.: Прочность — пластичность материалов в ультразвуковом поле, ч. II. Минск, «Наука и техника», 1973, 119-121.
6. *Розенберг Л. Д., Сиротюк М. Г.* Об излучении звука при наличии кавитации. *Акуст. ж.*, 1960, 6, 4, 478-481.
7. *Зарембо Л. К.* Акустические течения. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука, под ред. Л. Д. Розенберга, т. 2. М., «Наука», 1968, 87-128.
8. *Семенова Н. Г.* Экспериментальное исследование образования, структуры и кинематики гидродинамического течения в звуковом поле. *Акуст. ж.*, 1974, 20, 1, 112-114.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила  
29 июля 1976 г.  
Окончательный вариант  
28 ноября 1978 г.