

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

PACS numbers: 61.50.-f, 62.30.+d, 64.70.dg, 81.10.Aj, 81.10.Fq, 81.10.Mx, 81.30.Fb

### Влияние вибрации на морфологию фронта при направленном затвердевании

О. П. Фёдоров<sup>\*,\*\*\*</sup>, В. Ф. Демченко<sup>\*\*,\*</sup>, Е. Л. Живолуб<sup>\*\*\*</sup>

*\*Институт космических исследований НАН Украины и Государственного космического агентства Украины, просп. Академика Глушкова, 40, корп. 4/1, 03187 Киев, Украина*

*\*\*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03150 Киев, Украина*

*\*\*\*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, бульв. Академика Вернадского, 36, 03142 Киев, Украина*

Методами прямого наблюдения за фронтом кристаллизации прозрачных веществ и численными экспериментами исследовано влияние вибрации на морфологию фазовой границы и закономерности тепломассопереноса в расплаве. Использовались технология Бриджмена выращивания кристаллов и наложение аксиальной вибрации на цилиндрический образец. Обнаружено сильное влияние формирующегося вследствие вибрации потока расплава на развитие неустойчивого фронта кристаллизации, а также зависимость параметров потока от соотношения амплитуд вибрационной и гравитационной конвекции.

---

Corresponding author: Evgenij Leonidovych Zhivolub  
E-mail: zhivolub@imp.kiev.ua

*\*Space Research Institute, N.A.S. and State Space Agency of Ukraine, 40, 4/1 Academician Glushkov Ave., UA-03187 Kyiv, Ukraine*

*\*\*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

*\*\*\*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine, 36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: O. P. Fedorov, V. F. Demchenko, and E. L. Zhivolub, Influence of Vibration on Morphology of Front During the Directional Solidification, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1681–1696 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.12.1681.

**Ключевые слова:** направленная кристаллизация, вибрация, морфология фронта кристаллизации, тепломассоперенос в расплаве, численное моделирование.

Методами прямого спостереження за фронтом кристалізації прозорих речовин і чисельними експериментами досліджено вплив вібрації на морфологію фазової межі та закономірності тепломасоперенесення в розтопі. Використовувалися Бріджменова технологія вироццування кристалів і накладення аксіальної вібрації на циліндричний зразок. Виявлено сильний вплив потоку розтопу, що формується внаслідок вібрації, на розвиток нестійкого фронту кристалізації, а також залежність параметрів потоку від співвідношення амплітуд вібраційної та гравітаційної конвекції.

**Ключові слова:** спрямована кристалізація, вібрація, морфологія фронту кристалізації, тепломасоперенесення в розтопі, чисельне моделювання.

The methods of direct observation of the crystallization front in transparent substances and numerical simulation are used in study of the effect of vibration on interface morphology, heat and mass transfer in the melt. The Bridgman crystal-growth technology is applied using axial vibration of cylindrical sample. A strong influence of the melt flow emerging due to vibration on crystallization front stability as well as the effect of the ratio of the amplitudes of vibration and gravity convection on melt flow parameters is observed.

**Key words:** directional solidification, vibration, morphology of crystallization front, heat and mass transfer in the melt, numerical simulation.

*(Получено 18 октября 2016 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вибрации, как и другим способам внешнего воздействия на кристаллизующийся расплав, уделяется все большее внимание в связи с поиском новых механизмов управления структурой и свойствами металлов и сплавов. Имеется в виду широкий круг технологий (металлургия, сварка, выращивание кристаллов, получение композитов), а также новые методы получения материалов в невесомости. В последнем случае важным фактором, влияющим на процессы тепло- и массообмена становятся неизбежные в полётных условиях неконтролируемые вибрационные воздействия (так называемый фактор *j-jitter*). При этом решаются две связанные между собой проблемы: устранение нежелательных вибраций и использование контролируемых вибраций для целенаправленного воздействия на расплав.

Известны несколько методических подходов к вибрационному воздействию: механические колебания образца как целого, крутильные колебания, введение вибрирующего тела в расплавленный

образец. Эти, а также идеологически близкие методы других воздействий (электромагнитное перемешивание, пульсирующий нагрев, ультразвуковое воздействие) образуют перспективное направление в современной науке и практике получения материалов.

Для создания новых технологий принципиально важно построение адекватной физической картины вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав. Сложность этой проблемы обусловлена тем, что приходится решать комплекс разнородных задач: гидродинамическую проблему движения расплава с учётом гравитационных и вибрационных сил, задачу тепломассопереноса в трёхмерном образце в поле температурного градиента, а также задачу движения (а также устойчивости) фазовой границы. В последние годы разными авторами получен ряд важных теоретических и экспериментальных результатов, существенно проясняющих сложную картину влияния вибрации на кристаллизующийся материал [1–8].

В работах Любимовой с соавторами [1–3] аналитическими методами установлены особенности высокочастотного вибрационного воздействия на распределение примесей и форму фронта кристаллизации. В частности, показано, что аксиальные колебания в условиях микрогравитации оказывают воздействие аналогичное гравитационной конвекции на Земле [1].

В экспериментальных работах [4, 5] исследовались возможности введения в расплав различной формы рабочих тел, при помощи которых расплав подвергался вибрационному воздействию. При этом получены данные о существенном улучшении структурно-чувствительных свойств кристаллов в результате вынужденного перемешивания расплава.

Эксперименты по затвердеванию в космических условиях с металлургическими монокристаллами [6, 7] показали сложный характер влияния вибрационной конвекции на распределение примесей перед фронтом. В частности установлено, что кристалл вырастает неоднородным на макро- и микроуровне, причём частоты распределения неоднородностей близки к частотам микроускорений [7].

Сильное модифицирующее влияние вибрационной конвекции на морфологию фронта связано с ролью потока расплава перед фронтом и соответствующим изменением температурного и концентрационного профиля перед растущим кристаллом. В работах [8–10] показано их влияние на макроструктуру и морфологическую устойчивость фронта. Так в [10] показано, что гравитационная конвекция заметно снижает критическую скорость потери устойчивости плоского фронта, а в [9] получена общая диаграмма уменьшения области устойчивого роста при увеличении скорости потока расплава.

Дальнейший прогресс в понимании физической картины роста

кристалла в расплаве при вибрационном воздействии может быть достигнут при совместном изучении гидродинамических процессов и процессов на фронте кристаллизации. В настоящей работе влияние вибрации изучалось в ходе прямого наблюдения за эволюцией фронта кристаллизации в прозрачном веществе — сукцинонитриле. Использовалась экспериментальная установка, которая обеспечивала непрерывную фиксацию структуры фазовой границы. Для изучения тепломассопереноса в расплаве применяли имитационное моделирование, параметры которого соответствовали эксперименту. Ставилась задача изучения морфологии фронта при наложении аксиальных вибраций в земных условиях, а также прогнозирования особенностей этого процесса в условиях микрогравитации.

## 2. МЕТОДИКА ПРЯМОГО НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовалось наложение вибрации вдоль вертикальной оси цилиндрического образца установки по выращиванию кристаллов по методу Бриджмена. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Расплавление образца и кристаллизация расплава осуществляется при помощи градиентного устройства, которое состоит из нагревателя, холодильника и расположенного между ними теплоизолирующего слоя. Образец перемещается относительно градиентного устройства с заданной скоростью  $v$  в диапазоне от 0,1–10 мкм/с). Температура нагревателя составляла 80°C, холодильника 15°C, что обеспечивало постоянный температурный градиент 30 град/см.

В экспериментальной установке, показанной на рис. 1, образец представлял собой герметичный стеклянный цилиндр, заполненный сплавом сукцинонитрил–0,1% вес. ацетона. По методике, описанной в нашей работе [11], получали монокристалл с ориентацией  $\langle 100 \rangle$ .

Фронт кристаллизации наблюдали с торца цилиндра через слой расплава, а также через боковую стенку. Наложение вибрации в аксиальном направлении обеспечивалось двумя вариантами устройств, электронным (рис. 1) и механическим, выбор которых определялся удобством одновременного наблюдения за фронтом и регистрации виброускорений. В случае неподвижного фронта кристаллизации использовали электронный блок вибрации, который обеспечивал относительные виброускорения  $g/g_0 = 0,4, 1,3, 1,6 (5, 11, 19 \text{ Гц})$ , где  $g_0$  — ускорение свободного падения.

В режиме протяжки (основной режим — 1,4 мкм/с) использовали механический блок, обеспечивавший  $g/g_0 = 1,3 (11 \text{ Гц})$ . Кроме того, проводились эксперименты без вибрации при скоростях выращивания 1,4, 2,8, 4,2, 5,6 и 7,0 мкм/с.

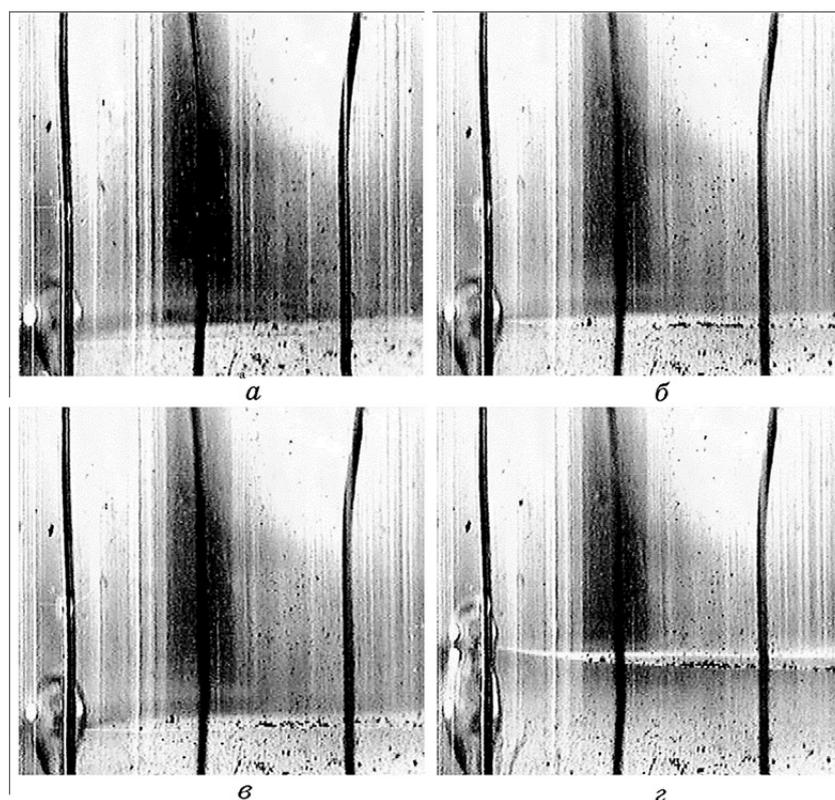


**Рис. 1.** Конструктивная схема экспериментальной установки с вибратором.

**Fig. 1.** Installation scheme for directional crystallization with vibration.

В режиме выращивания без вибрации наблюдали следующую эволюцию морфологии фронта: при постоянной скорости выращивания ( $1,4 \text{ мкм/с}$ ) в течение  $120\text{--}160$  минут наблюдался плоский фронт, затем в течение  $80$  минут — структура узлов (нод), которая переходила в ячеистую структуру. Такая нестационарность связана с накоплением примеси перед фронтом в процессе выращивания, созданием условий потери устойчивости и развития неустойчивой морфологии [11, 12].

Эволюция фронта под воздействием вибрации существенно отличалась для различных интенсивностей вибрации. При неподвижном образце и  $g/g_0 = 0,4$  (режим № 1, частота  $5 \text{ Гц}$ ) наблюдалось продвижение плоского фронта без потери устойчивости. При этом фронт искривлялся в области стенок (рис. 2). Снятие вибровоздействия возвращало фронт в исходное состояние. При большей интенсивности вибрации (режимы № 2, 3;  $g/g_0 = 1,3, 1,6$ ) происходит взрывообразное ускорение фронта, сопровождающееся образованием мелких

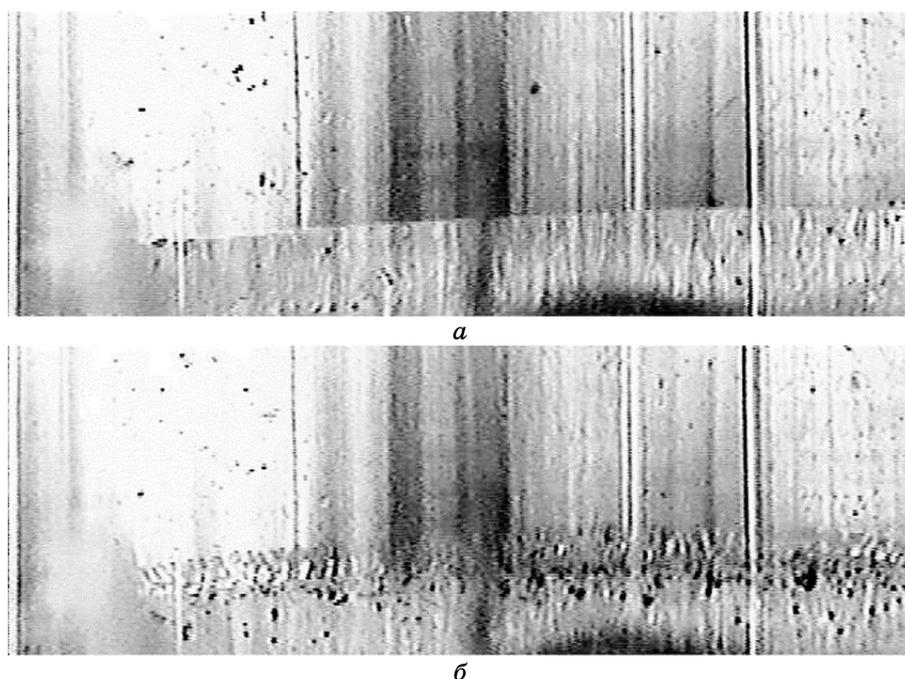


**Рис. 2.** Влияние низкочастотной вибрации  $f = 5$  Гц на отклонение фазовой границы от положения равновесия: *а, в* — положение фазовой границы до вибрационного воздействия, *б, г* — после вибрационного воздействия; *б* — амплитуда вибрации — 3 мм, *г* — амплитуда вибрации — 6 мм.

**Fig. 2.** Influence of  $f = 5$  Hz vibration on interface position: *a, в*—position of interface before vibration influence, *б, г*—after vibration influence; *б*—vibration amplitude is 3 mm, *г*—vibration amplitude is 6 mm.

дендритов (рис. 3). С течением времени структурные элементы укрупняются, кристаллическая структура становится сплошной, а форма фронта близка к той, которая наблюдалась для режима № 1.

В серии экспериментов вибрационное воздействие ( $g/g_0 = 1,3$ ) включали в процессе выращивания на каждом из упомянутых этапов развития структуры. На рисунке 4 приведены формы фронта сразу после выключения вибрационного воздействия. Дальнейшая выдержка при снятии вибраций приводит к возвращению к исходной структуре фронта (нодам, ячейкам или плоскому фронту). Эксперименты показали пороговый характер вибрационного воздействия — указанный скачок в развитии неустойчивой структуры



**Рис. 3.** Потеря устойчивости границей раздела фаз при вибрационном воздействии с частотой 11 Гц: *a* — граница раздела фаз до вибрационного воздействия, *б* — граница раздела фаз после вибрационного воздействия.

**Fig. 3.** The loss of interface stability during influence of vibration with frequency of 11 Hz: *a*—interface before vibration, *б*—interface after vibration.

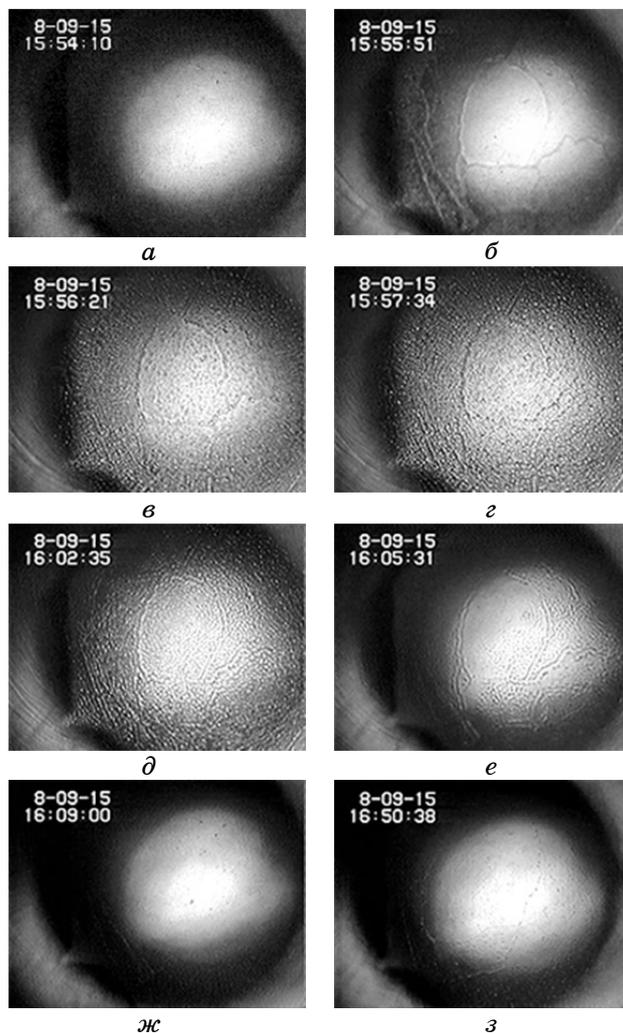
оставался качественно неизменным при различных временах вибрационного воздействия от 30 с до 10 минут.

Эффект вибрационного воздействия слабо зависит от положения образца в рабочем блоке по отношению к нагревателю и холодильнику. Эти опыты проводились в процессе выращивания и различном положении образца относительно изотермы, соответствующей равновесной температуре.

Проводились тестовые эксперименты в установке Бриджмена для квазидвумерных образцов [12] с применением тех же частот и амплитуд, т.е. фронт кристаллизации колебался относительно изотермы в процессе продвижения, что достигалось соответствующей настройкой шагового двигателя. В этой геометрии эксперимента влияния вибрации на морфологию фронта не обнаружено.

Для выявления нестационарных вторичных вихрей, полученных в расчётном эксперименте, в расплав сукцинонитрила вводились маркёры — споры ликоподия, движение которых фиксировалось видеокамерой.

Движущиеся в расплаве маркёры можно разделить на две группы. В первой из них траектории частиц соответствовали циркуляции расплава в глобальном вихревом течении. Вторая группа маркеров совершала колебательные движения вблизи фронта кристал-



**Рис. 4.** Эволюция морфологии границы раздела фаз кристалл–расплав в монокристалле сукцинонитрила, выращенного со скоростью 1,4 мкм/с. Влияние низкочастотной вибрации осуществлено на стадии существования плоской фазовой границы кристалл–расплав.

**Fig. 4.** Evolution of interface morphology in succinonitrile single crystal grown with speed of 1.4  $\mu\text{m/s}$ . Influence of vibration is realized on the stage of planar interface.

лизации, что может свидетельствовать о существовании вторичных вихрей, предсказанных численным моделированием (см. ниже). Упрощённая экспериментальная схема не даёт возможности получить количественные данные о скоростях потоков, однако характер движения частиц у фронта качественно свидетельствует о нестационарном характере движения расплава вблизи фронта и существовании нескольких контуров циркуляции вблизи фронта кристаллизации.

Для полуколичественной оценки воздействия вибрации на параметры морфологии фронта монокристаллы сукцинонитрила выращивали с различными скоростями протяжки 2,8, 4,2, 5,6 и 7,0 мкм/с без вибрации. Сравнение дисперсности дендритов в этих экспериментах и экспериментах с вибрацией показало, что наложение вибрации ( $g/g_0 = 1,3$  (11 Гц)) приводит к такой дисперсности дендритов, которая соответствует скорости выращивания 7,0 мкм/с, т.е. наложение вибрации соответствует увеличению скорости выращивания в 5 раз при неизменных прочих условиях.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРИСТАЛЛА МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

Математическое описание тепловых и гидродинамических процессов в кристаллизующемся препарате рассматривалось в осесимметричном приближении. Такое предположение является оправданным для градиентного устройства, использованного при выращивании кристалла. Сопряжённая задача гидродинамики и теплообмена базируется на уравнении конвективно-кондуктивного переноса энергии

$$\begin{aligned} c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad r, z \in \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнениях гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + F_z, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) = 0.$$

Здесь  $\{r, z\}$  — цилиндрические координаты,  $t$  — время,  $T$  — температура,  $c, \rho, \lambda$  — теплоёмкость, плотность и теплопроводность материала соответственно,  $\mathbf{V} = \{V_r, V_z\}$  — вектор скорости движения расплава,  $P$  — давление,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $F_z = g\beta_T T$  — объёмная плотность подъёмной силы Архимеда,  $g = g(t)$  — ускорение,  $\beta_T$  — коэффициент объёмного расширения расплава.

Уравнение (1) интегрируется в прямоугольнике  $\Omega_T = \{0 < r < R, 0 < z < L\}$ , где  $R$  и  $L$  — соответственно внешний радиус ампулы и её длина. Область  $\Omega_T$  включает расплав, плавящуюся заготовку, а также стенку ампулы, теплоперенос вдоль которой учитывается из-за высокого коэффициента теплопроводности ампулы (по сравнению с теплопроводностью препарата). Расчётная область  $\Omega_V = \{0 < r < R_0, 0 < z < L\}$ , в которой интегрируются уравнения (2), ограничивается плавящейся заготовкой и расплавом. При этом в части области  $\Omega_V$ , занимаемой твёрдой фазой, коэффициент кинематической вязкости полагается в  $10^6$  раз большим, чем в расплаве; это обеспечивает в твёрдой фазе кристаллизующегося препарата скорость равную нулю.

Сформулируем граничные условия. При  $r=0$  имеет место симметрия температурного поля и поля скоростей

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial V_z}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad V_r|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

На стенках ампулы граничные условия для уравнений (2) задаются в виде

$$V_z|_{z=0,L} = 0, \quad V_r|_{r=R_0} = 0. \quad (4)$$

Предполагается, что теплообмен торцевых поверхностей ампулы с окружающей средой отсутствует, т.е.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \quad (5)$$

На внешней стенке ампулы задаётся условие теплообмена ампулы с нагревателем (холодильником) в соответствии с законом Ньютона–Рихмана:

$$\lambda (\partial T / \partial r)|_{r=R} = \alpha(z) [T(R, z, t) - T_h(z, t)], \quad (6)$$

где  $\alpha(z)$  — коэффициент теплопередачи между внешней стенкой

ампулы и нагревателем,  $T_h(z, t)$  — температура нагревателя (холодильника). Коэффициент теплопередачи  $\alpha = \lambda_r / \delta$  рассчитывался как величина, обратная термическому сопротивлению газового зазора ( $\lambda_r$  — коэффициент теплопроводности газового зазора,  $\delta$  — его толщина); на границе контакта ампулы с изолятором  $\alpha$  полагался равным нулю. На фронте кристаллизации полагаются выполненными условия идеального теплового контакта между жидкой и твёрдой фазами (при скоростях кристаллизации 1–10 мкм/с выделением скрытой теплоты можно пренебречь). В начальный момент времени задаётся исходное положение системы нагреватель–изолятор–холодильник относительно ампулы.

Ускорение  $g = g(t)$  представим в виде суммы  $g(t) = g_0 + g_v(t)$ , где  $g_0$  — фоновое, а  $g_v(t)$  — вибрационное ускорения. Будем считать, что вибрационные колебания осуществляются вдоль оси кристалла и являются гармоническими, так что  $g_v(t) = 4A\pi^2\omega^2 \sin 2\pi\omega t$ , где  $\omega$  — частота колебаний,  $A$  — их амплитуда.

Числовые значения параметров, входящих в математическое описание, выбирались следующими:  $R = 7,5$  мм, длина нагревателя 100 мм, длина изолятора 10 мм, длина холодильника 20 мм, температура нагревателя 85°C, температура холодильника 15°C. Использовались значения термодинамических и транспортных параметров сукцинонитрила из работы [12].

Наибольший интерес представляют потоки расплава вблизи фронта кристаллизации, так как именно они определяют устойчивость роста кристалла и его морфологию. Под действием подъёмной силы в жидкой фазе образуется глобальное вихревое течение: вблизи стенки расплав поднимается кверху ампулы, в осевой части ампулы формируется нисходящее течение, направленное к фронту кристаллизации. При торможении потока расплава вблизи фронта кристаллизации формируются неустойчивые слабоинтенсивные вторичные вихри, которые периодически разрушаются и возникают вновь (рис. 5, а).

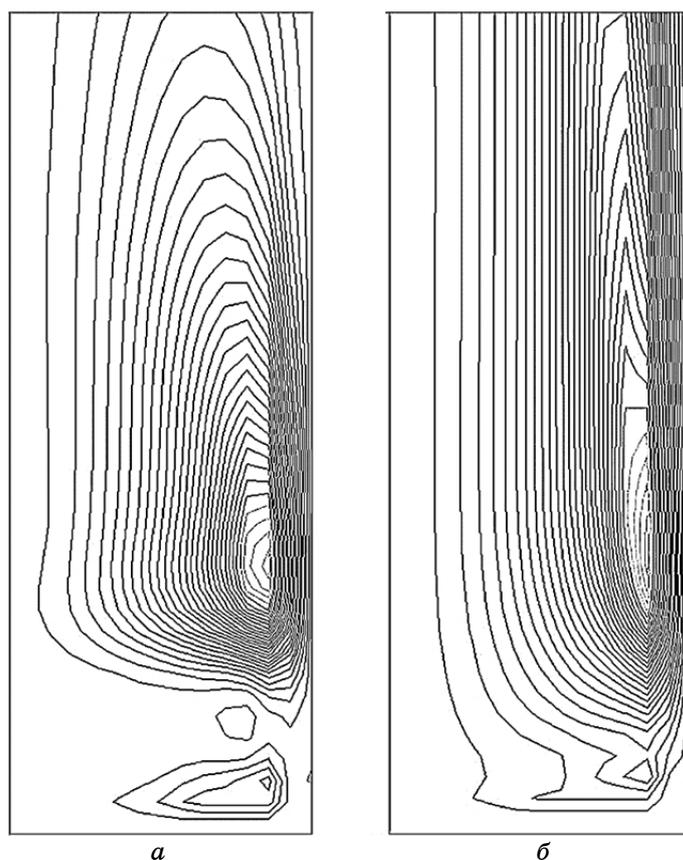
При наложении вибрации с частотой 11 Гц ( $\max |g_v| = 0,5g_0$ ) уже на первом вибрационном цикле вторичные вихри, образовавшиеся до начала вибрации, разрушаются, и формируется одноконтурная схема циркуляции расплава, которая поддерживается в процессе дальнейших циклов вибрации. При этом центр глобального вихря смещается к стенке ампулы, скорости потоков в осевой зоне существенно ослабевают (рис. 5, б).

Качественно иная картина возникает при наложении вибрации в отсутствии силы тяжести ( $g_0 = 0$ ). На рисунке 6 представлены картины линий тока в разные времена первого полупериода вибрационного цикла при  $\omega = 1$  Гц,  $A = 1$  мм. При изменении знака виброускорения в нижней части расплава зарождается вихрь, циркулирующей в направлении, противоположном направлению вращения

глобального вихря, который существовал до изменения знака виброускорения.

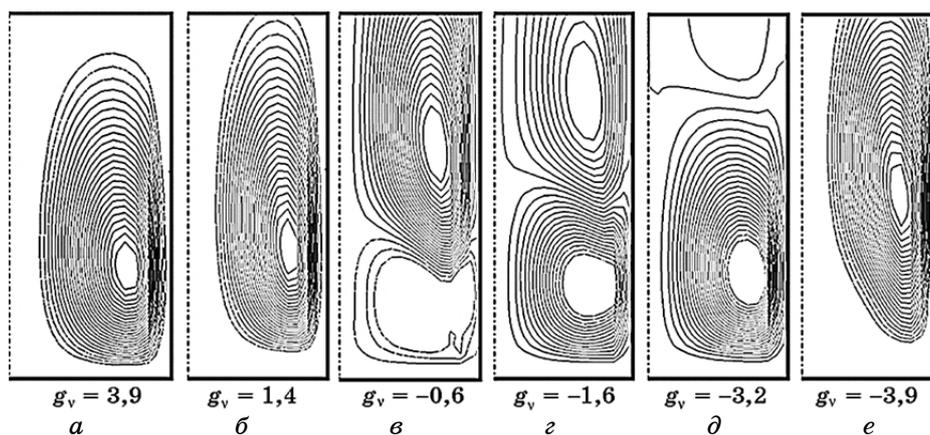
Новообразовавшийся вихрь постепенно вытесняет в верхнюю часть ампулы первоначальный вихрь вплоть до полного его исчезновения. Во втором полупериоде вибрационного цикла формируется аналогичное нестационарное течение жидкой фазы, но с противоположным направлением вращения новообразующегося вихря. Достаточно нескольких десятков циклов вибрации чтобы установилась подобная периодическая структура течения расплава.

Описанное влияние вибрации на гидродинамику расплава можно трактовать как квазистационарную релей-тейлоровскую неустойчивость движения жидкой фазы в условиях непрерывного распре-



**Рис. 5.** Структура потоков расплава при земных условиях выращивания кристалла (*a* — без вибрации, *б* — с вибрацией при  $A = 1$  мм,  $\omega = 11$  Гц).

**Fig. 5.** Melt flow configuration under terrestrial growth conditions (*a*—without vibration, *б*—under vibration with  $A = 1$  mm,  $f = 11$  Hz).



**Рис. 6.** Изолинии функции тока в различные моменты времени первого полупериода вибрационного цикла (величины вибрационного ускорения представлены в  $\text{см}/\text{с}^2$ ).

**Fig. 6.** Melt flow isolines for different moments of the first half-period of vibration (acceleration values is given in  $\text{cm}/\text{s}^2$ ).

деления плотности расплава в его объёме. Вычислительным экспериментом установлено, что подобные гидродинамические осцилляции расплава поддерживаются и при других частотах вибрации в диапазоне до 20 Гц.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние гравитационной конвекции на морфологию фронта в описанных выше экспериментальных условиях отчётливо проявляется в специфике макро- и микроструктуры фронта кристаллизации. Так, асимметрия nodной и ячеистой структуры поперечных сечений образца, а также специфическое углубление в осевой части кристалла наблюдается в металлических и прозрачных органических кристаллах. Кроме того, течение расплава вдоль фронта приводит к существенному снижению критической скорости потери устойчивости [1, 9].

Гравитационная конвекция в расплаве возникает вследствие радиального градиента температуры [13], который оказывается существенным в практически важных случаях выращивания кристаллов в земных условиях. В космосе ситуация существенно иная: гравитационной конвекции нет, однако возникает вибрационная составляющая, которая определяется нерегулярными микроускорениями в диапазоне частот до 15 Гц и амплитуд порядка 1 мкм.

Построение полной физической картины течения расплава под

действием гравитационной и вибрационной конвекции в широком диапазоне параметров представляется трудной задачей. В данной работе исследовались типичные размеры образцов с прозрачным модельным сплавом на основе сукцинонитрила, которые используются для наземных и космических экспериментов. Кроме того, в задачу работы входил поиск характерных режимов вибрационного воздействия в том диапазоне, который включает характерные для орбитальных условий значения. Используемые частоты следует считать высокими, поскольку частота воздействия много больше обратных времён угасания возмущений температуры и скорости.

Относительный вклад вибрационной и гравитационной конвекции оценивают, сопоставляя соответствующие числа Рэлея [1, 2]. В настоящей работе использовали упрощённый эмпирический критерий, оценивая экспериментальный параметр  $g/g_0$ . При этом расчёты проводили для условий близких к экспериментальным. О корректности сопоставления экспериментальных и расчётных данных могут свидетельствовать измерения минимального времени, в течение которого устанавливается новая структура фронта, которое оказалось сопоставимым с характерным временем в вычислительном эксперименте (менее 30 секунд).

Обнаруженные эффекты воздействия аксиальной вибрации относятся к разным масштабам воздействия на структуру фронта. В макроскопическом масштабе происходит изменение формы глобального вихря, которое отражается на экспериментально обнаруженной форме фронта. Кроме того, происходит исчезновение осциллирующих вторичных вихрей вблизи фронта кристаллизации. Расчётные и экспериментальные данные, по всей видимости, подтверждают вывод о том, что аксиальная вибрация усиливает действие гравитационной конвекции. Причём при определённых параметрах принудительная вибрация может регулировать гидродинамические потоки в расплаве.

В условиях микрогравитации, когда вибрационная конвекция становится определяющей, обнаружен эффект дестабилизации глобального потока вследствие возникновения неустойчивости типа Рэлея–Тейлора. Это накладывает серьёзные ограничения на применение метода Бриджмена в космических условиях.

Неожиданно сильным оказалось влияние вибрационной конвекции на микроструктуру фронта. При определённых значениях вибрационного воздействия наблюдались взрывообразная потеря устойчивости и образование дисперсных дендритов, что соответствовало увеличению скорости протяжки в отсутствии вибрации (и, соответственно, движущей силы кристаллизации) в 5 раз. Причём такой эффект соответствует  $g/g_0 > 1$ , тогда как при обратном знаке неравенства происходит продвижение неискажённого фронта. Ранее аналитическими методами показано, что вибрация приводит к

существенному снижению критической скорости потери устойчивости плоского фронта [1]. Полученные данные подтверждают этот вывод, а также предсказание того, что движение расплава перед фронтом существенно сужает область устойчивого фронта кристаллизации [9]. По всей видимости этот эффект ещё более выражен в условиях микрогравитации, когда вибрационная конвекция становится определяющей.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Расчётный эксперимент показывает, что при использовании схемы Бриджмена аксиальное вибрационное воздействие на цилиндрический образец приводит к существенному изменению структуры потоков вблизи фронта кристаллизации, особенности которых определяются соотношением амплитуд виброускорения и ускорения силы тяжести. При  $|g_v| < g_0$  (земные условия) наблюдается подавление нестационарных вихрей, а при обратном знаке неравенства (условия микрогравитации) развивается рэлей-тейлоровская неустойчивость течения расплава.

2. Аксиальная вибрация цилиндрического образца приводит к формированию потока вдоль поверхности фронта, причём его возникновение имеет пороговый характер, а время формирования слабо зависит от частоты колебаний.

3. Возникающий вследствие аксиальной вибрации образца поток способствует потере устойчивости плоского фронта и возникновению неустойчивых структурных элементов, ячеек и дендритов. Снятие вибраций приводит к возвращению к исходной структуре фронта. Оценки по дендритным параметрам показывают, что наложение вибрации  $g/g_0 = 1,3$  (11 Гц) эквивалентно увеличению скорости протяжки (без вибрации) в 5 раз.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. C. Yu, Z. B. Chen, W. T. Hsu, B. Roux, T. P. Lyubimova, and C. W. Lan, *J. Crystal Growth*, **271**: 474 (2004).
2. C.-W. Lan, D. Lyubimov, T. P. Lyubimova, D. V. Lyubimov, and B. S. Maryshev, *Fluid Dynamics*, **43**, No. 4: 523 (2008).
3. D. Lyubimov, T. P. Lyubimova, A. A. Tcherepanov et al., *Intern. J. Microgravity Res. Appl.*, **16**, No. 1: 290 (2005).
4. A. Fedyushkin, N. Bourago, V. Polezhaev, and E. Zharikov, *J. Crystal Growth*, **275**: 1557 (2005).
5. Е. В. Жариков, И. Х. Аветисов, А. В. Скоренко и др., *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9: 56 (2001).
6. В. С. Земсков, М. Р. Раухман, В. П. Шалимов, *Поверхность*.

- Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9: 41 (2001).
7. В. С. Земсков, М. Р. Раухман, В. П. Шалимов, *Итоги экспериментов ИМЕТ РАН по выращиванию монокристаллов в условиях полётов космических аппаратов* (Москва: Наука: 2013), с. 383.
  8. A. I. Fedoseyev and J. D. Alexander, *J. Crystal Growth*, **211**: 34 (2000).
  9. О. П. Федоров, А. Г. Машковский, *Кристаллография*, **60**, № 2: 260 (2015).
  10. L. Buhler and S. H. Davis, *J. Cryst. Growth*, **186**: 629 (1998).
  11. О. П. Федоров, *Процессы роста кристаллов: кинетика, формообразование, неоднородности* (Киев: Наукова думка: 2010).
  12. О. П. Федоров, В. Ф. Демченко, И. В. Шуба, А. Б. Лесной, *Физика и химия обработки материалов*, № 5: 85 (2015).
  13. Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий, *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости* (Москва: Наука: 1972).

## REFERENCES

1. W. C. Yu, Z. B. Chen, W. T. Hsu, B. Roux, T. P. Lyubimova, and C. W. Lan, *J. Crystal Growth*, **271**: 474 (2004).
2. C.-W. Lan, D. Lyubimov, T. P. Lyubimova, D. V. Lyubimov, and B. S. Maryshev, *Fluid Dynamics*, **43**, No. 4: 523 (2008).
3. D. Lyubimov, T. P. Lyubimova, A. A. Tcherepanov et al., *Intern. J. Microgravity Res. Appl.*, **16**, No. 1: 290 (2005).
4. A. Fedyushkin, N. Bourago, V. Polezhaev, and E. Zharikov, *J. Crystal Growth*, **275**: 1557 (2005).
5. E. V. Zharikov, I. H. Avetisov, A. V. Skorenko et al., *Poverkhnost. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya*, No. 9: 56 (2001) (in Russian).
6. V. S. Zemskov, M. R. Rauhman, and V. P. Shalimov, *Poverkhnost. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya*, No. 9: 41 (2001) (in Russian).
7. V. S. Zemskov, M. R. Rauhman, and V. P. Shalimov, *Itogi Eksperimentov IMET RAN po Vyrashchivaniyu Monokristallov v Usloviyakh Poletov Kosmicheskikh Apparatov* (Moscow: Nauka: 2013), p. 383 (in Russian).
8. A. I. Fedoseyev and J. D. Alexander, *J. Crystal Growth*, **211**: 34 (2000).
9. O. P. Fedorov and A. G. Mashkovskii, *Kristallografiya*, **60**, No. 2: 260 (2015) (in Russian).
10. L. Buhler and S. H. Davis, *J. Cryst. Growth*, **186**: 629 (1998).
11. O. P. Fedorov, *Protsessy Rosta Kristallov: Kinetika, Formoobrazovanie, Neodnorodnosti* [Crystal Growth Processes: Kinetics, Shape Formation, Inhomogeneities] (Kyiv: Naukova Dumka: 2010) (in Russian).
12. O.P. Fedorov, V. F. Demchenko, I. V. Shuba, and A. B. Lesnoi, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 5: 85 (2015) (in Russian).
13. G. Z. Gershuni and E. M. Zhukhovickii, *Konvektivnaya Ustoychivost Neszhimaemoy Zhidkosti* (Moscow: Nauka: 1972) (in Russian).