

УДК 532.516.5:534.11

© 1997 г. О.А. БУШМАКИН, Н.А. ВЕРЕЗУБ, Е.В. ЖАРИКОВ,
А.З. МЯЛЬДУН, А.И. ПРОСТОМОЛОТОВ

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПРИ АКСИАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ ДИСКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АМПУЛЕ

Экспериментально исследованы изотермические движения вязкой модельной жидкости в цилиндрической ампуле при вибрациях погруженного в нее коаксиального диска. В качестве модельной жидкости использованы водоглицериновые смеси с различным процентным соотношением компонент. Изучены структуры течения, их масштабы и устойчивость в зависимости от амплитудно-частотных параметров вибраций диска, изменения вязкости жидкости, а также от конфигурации нижней поверхности диска и наличия в его центре отверстия.

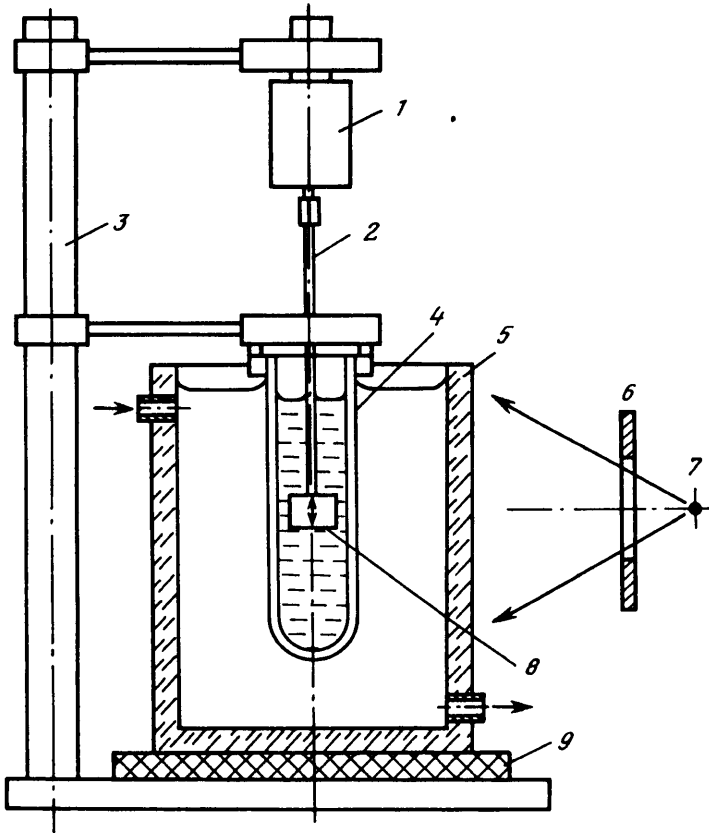
Механические колебания твердого тела в жидкостях способны интенсифицировать перенос субстанций, что, например, важно в процессах кристаллизации и растворения [1–3]. Известно, что при ламинарном движении потока теплоотдача от вибрирующей поверхности нагрева эффективно управляется амплитудно-частотными параметрами колебаний и их наложение обеспечивает существенное увеличение коэффициента теплоотдачи (см., например, [1]).

Практическое применение находят различные варианты вибрационного воздействия. Например, в технологии новых материалов представляет интерес стационарное движение жидкости в вертикальном цилиндрическом контейнере, возбуждаемое его колебаниями по эллиптической траектории в горизонтальной плоскости [4]. Это вибрационное воздействие при частоте 10 Гц и амплитуде 3 мм приводит в движение всю жидкость в сосуде. В значительной степени перемешивание зависит от выбора частоты колебаний и структуры поверхностных волн, которые вызывают заметное конвективное движение. По мнению авторов [4], значительная величина амплитуды колебаний в сочетании с низкой частотой могут приводить к нежелательным тепловым возмущениям в неизотермической жидкости.

В [5] описано явление возникновения стационарной струи, образующейся у конусного отверстия в диске, совершающем нормальные колебания в жидкости. Известно также возникновение струй при колебаниях системы соосных дисков, как сплошных, так и перфорированных цилиндрическими отверстиями [6]. В этом случае длина струй у конусных отверстий достигает десятков сантиметров при амплитуде колебаний несколько миллиметров и частотах десятки герц. При этом перемешивание возникает вследствие направленной циркуляции жидкости, вызванной разностью гидравлических сопротивлений суживающегося и расширяющегося каналов.

Теоретическое рассмотрение низкочастотных синхронных колебаний двух плоскопараллельных пластин с содержащейся между ними жидкостью проведено в [7]. Показано, что в слое жидкости могут возникать конвективные вихри при определенной ориентации направлений колебаний и температурного градиента в жидкости. Известен ряд экспериментов по возбуждению стационарных течений в узком слое жидкости при вибрациях пластины с частотой 150 Гц [8].

В [9–11] исследованы течения, возникающие в жидкости при вибрации погруженного или соприкасающегося с ней твердого тела. Например, в [10] аксиальные виб-



Фиг. 1. Схема экспериментального стенда

рации цилиндрического тела конечных размеров исследовались в узком горизонтальном слое жидкости, неограниченном в радиальном направлении, и определялась структура течения, в частности, вблизи кромки вибрирующего диска.

Явление вибрационной конвекции в ограниченных областях для вибрирующих тел конечных размеров не может быть вполне объяснено на основе пограничного приближения [12], что следует из сопоставления характерных размеров и формы стационарных вихревых течений и параметров колебаний тел. Отличие от шлихтинговских течений возникает из-за влияния реальной геометрии течения, приводящей к возникновению движения вблизи кромок и ребер колеблющегося тела. Условиями отрыва пограничного слоя вблизи кромок объясняется тот факт, что в этих случаях стационарные течения наблюдаются при существенно меньших значениях амплитуды по сравнению со шлихтинговскими.

Эти особенности и влияние замкнутости области течения расплава в технологических приложениях, например при выращивании кристаллов методом Чохральского, обусловили проведение цикла работ по физическому и математическому моделированию вибрационной конвекции в цилиндрических тиглях при аксиальных вибрациях цилиндрического имитатора кристалла [13–15]. В этих работах изучены изотермические и неизотермические течения модельных жидкостей, определены режимы устойчивости структур течения в зависимости от параметров вибрации и уровня погружения вибрирующего диска в жидкость.

Настоящая работа продолжает этот цикл исследований применительно к геометрическим особенностям модели метода выращивания кристаллов по Стокбаргеру [16]. В данном случае геометрия течения характеризуется близостью поверхности вибрирующего тела к боковым стенкам ампулы при одновременной ее удаленности от дна.

Анализируются течения, возникающие между нижней поверхностью вибрирующего диска и дном ампулы. Исследуется устойчивость и масштабы вибрационных течений в зависимости от амплитудно-частотных параметров вибрации, вязкости жидкости, формы нижней вибрирующей поверхности и наличия в ней центрального отверстия.

1. Постановка эксперимента. Схема экспериментального стенда и его общий вид приведены на фиг. 1. В качестве модели ампулы использованы цилиндрические стеклянные сосуды 4 с внутренним диаметром $D = 10,0, 18,6, 32,2$ и $41,0$ мм. Ампула размещается в прямоугольной кювете 5 из плексигласа, через которую с помощью термостата У8 прокачивается термостатирующая жидкость. Помимо термостатирования ампулы вода существенно уменьшает оптические искажения при наблюдении и регистрации потоков.

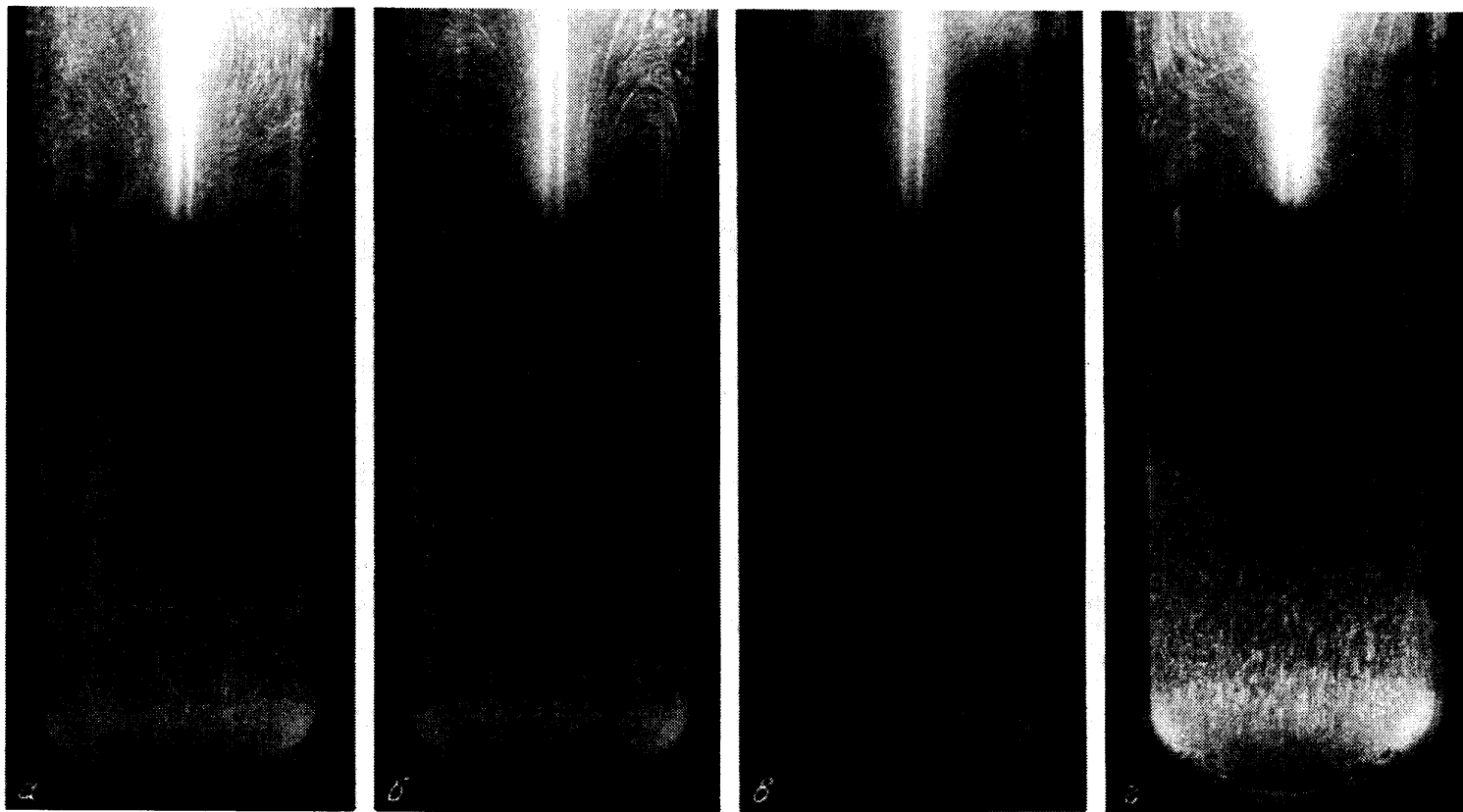
Диск 8 диаметром d и толщиной $d/2$ закреплен на штоке 2, смонтированном на оси вибратора 1. Вибратор с телом неподвижно установлен на штативе 3, несоосность ампулы и тела при этом не превышает $0,1$ мм. Отклонение нижней плоскости тел цилиндрической и кубической формы от горизонтали не превышает 10 мкм. Кювета с ампулой установлена на виброизолирующей плите 9, препятствующей влиянию посторонних неконтролируемых вибраций.

Для возбуждения вибраций использован электромеханический вибрационный преобразователь, обладающий широким диапазоном изменения амплитуды (до $1,5$ мм) и позволяющий регулировать частоту колебаний в пределах $0-300$ Гц. От генератора ГЗ-112 сигнал поступал на возбуждающую катушку вибратора. Амплитуда вибраций измерялась с помощью катетометра В-630 либо микроскопа МБС-10 и строилась ее градуировочная зависимость от подаваемого напряжения. Для регистрации параметров колебаний предусмотрена возможность подачи сигнала с катушки регистрации вибратора на цифровой вольтметр и осциллограф: цифровым вольтметром фиксировалось подаваемое напряжение и соответственно амплитуда колебаний, по осциллографу контролировались форма и частота колебаний. Помимо аналоговых приборов осуществлялась обработка сигналов через АЦП на компьютере.

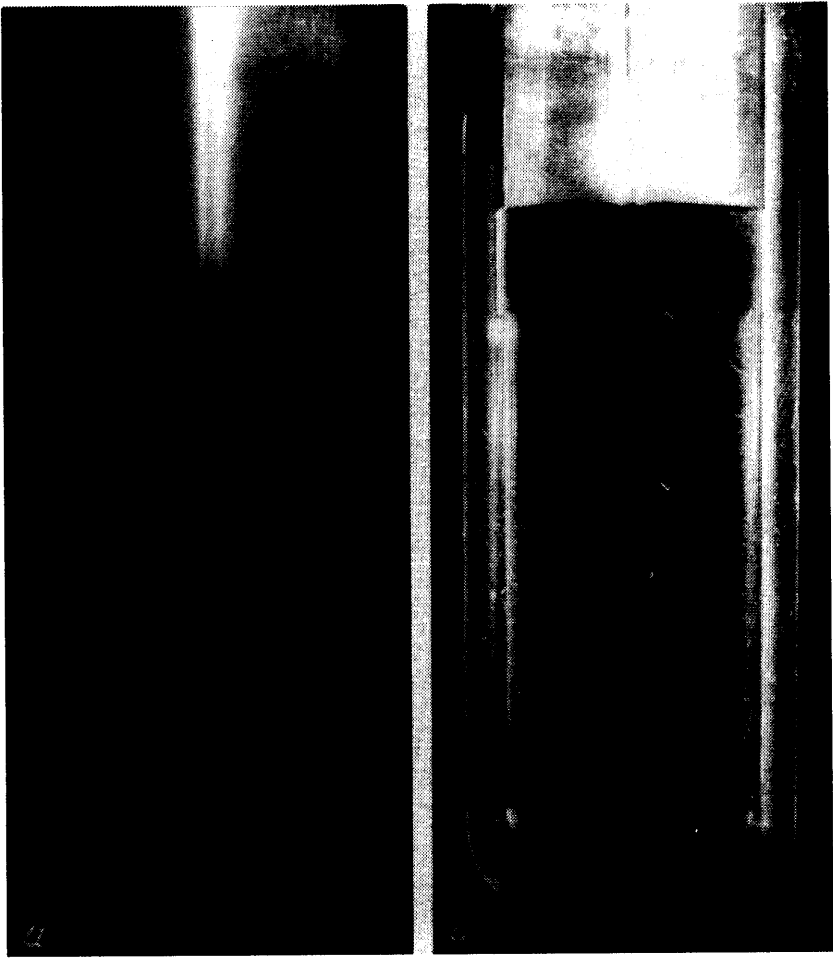
В качестве модельной жидкости использована дистиллированная вода ($\nu = 0,01$ см²/с) и водоглицериновая смесь с содержанием глицерина 92% веса ($\nu = 2,65$ см²/с). Эксперименты проводились при $d/D = 0,51-0,98$, $H/D = 0,33-3,00$, где H – глубина жидкости. Частота вибраций изменялась от 2 до 100 Гц, амплитуда – от 25 до 1500 мкм, значения вибрационного числа Рейнольдса Re_ν – от $1,3$ до 20 ($Re_\nu = 2\pi f A^2/\nu$, где f – частота, A – амплитуда вибрационного воздействия).

Визуализация структуры течений осуществлялась путем использования взвешенных в жидкости алюминиевых частиц и подсветки их вертикальным плоским пучком света – "световым ножом". Источником света 7 служил проектор "Киев-66" с щелевой диафрагмой 6 шириной 1 мм. Наблюдение структуры течений и измерение их характерных размеров производилось с помощью катетометра В-630 с точностью 10 мкм. Картины течения жидкости фотографировались зеркальной фотокамерой "Зенит-19" с объективом "Helios-44М".

2. Результаты исследования. Влияние амплитудно-частотных параметров вибраций и параметра d/D . Наибольший интерес представляет динамическое управление движением жидкости под действием вибраций диска. В этом случае для управления можно использовать изменение как амплитуды, так и частоты вибраций. Оба эти размерные параметры входят в вибрационное число Рейнольдса, в соответствии со значениями которого достигается подобие вибрационных течений с различными значениями амплитудно-частотных характеристик при одинаковых числах Re_ν . Однако опыт предшествующих работ указывает на появление особенностей таких вынужденных течений в виде нелинейных эффектов (типа гистерезиса) при управлении течением путем изменения амплитуды или путем изменения частоты вибрации [14]. В данной серии экспериментов поиск нелинейных эффектов был продолжен, однако бифуркаций по Re_ν обнаружено не было.



Фиг. 2. Структуры течения в зависимости от амплитудно-частотных параметров вибрации диска: $a - A = 50$ мкм, $f = 80$ Гц; $b - 100, 80$; $v - 200, 80$; $z - 100, 27$



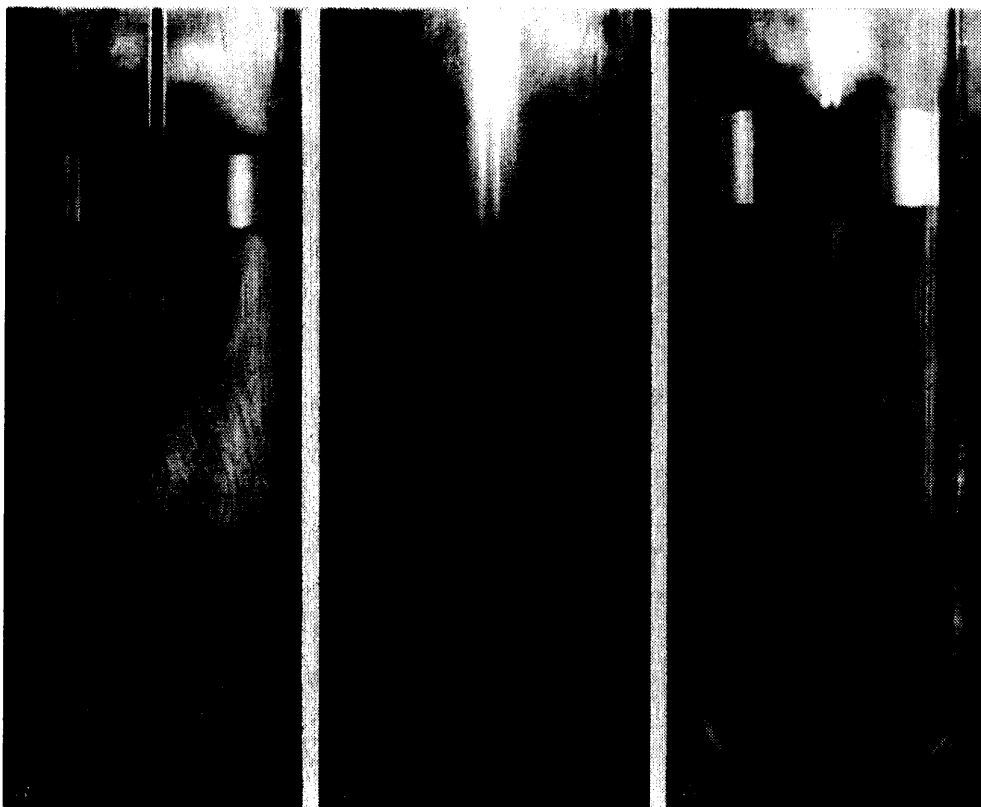
Фиг. 3. Структура течения в зависимости от вязкости модельной жидкости ($A = 200$ мкм, $d/D = 0,76$, $D = 41,0$ мм): $a - \nu = 0,01$ см²/с, $f = 80$ Гц, $Re_\nu = 20$; $b - 2,65, 70, 0,07$

На фиг. 2 представлены структуры течения, реализуемые в ампуле, при различных амплитудно-частотных параметрах вибраций диска. В этих вариантах вязкость и геометрические параметры были зафиксированы: $\nu = 0,01$ см²/с, $D = 41,0$ мм, $d/D = 0,76$.

Увеличение амплитуды вибрации диска $A = 50, 100$ и 200 мкм ($Re_\nu = 1,3; 5,0; 20,0$) при частоте 80 Гц приводит к возрастанию масштаба вибрационного течения на всю глубину ампулы. При $A = 50$ мкм масштаб течения сравнительно невелик и не превышает величины $d/2$, при увеличении амплитуды до 100 мкм течение практически достигает дна ампулы и при $A = 200$ мкм течение занимает весь доступный объем.

При уменьшении частоты колебаний до 27 Гц при $A = 100$ мкм (фиг. 2, z) наблюдается заметное уменьшение масштаба течений по сравнению со случаем $f = 80$ Гц (b). Сравнение структуры течений при $Re_\nu = 1,7$ (z) и при близком значении $1,3$ (a) показывает, что в обоих случаях реализуются практически одинаковые структуры и масштабы течений. Это свидетельствует о подобии вибрационных течений по числу Re_ν .

Отметим, что вариация соотношения d/D позволила установить, что интенсивность течений несколько возрастает при увеличении диаметра диска. Течения одинакового масштаба возникают при вибрациях диска с отношением $d/D = 0,76$ и $0,98$, при этом $Re_\nu = 5,0$ и $0,9$ соответственно.



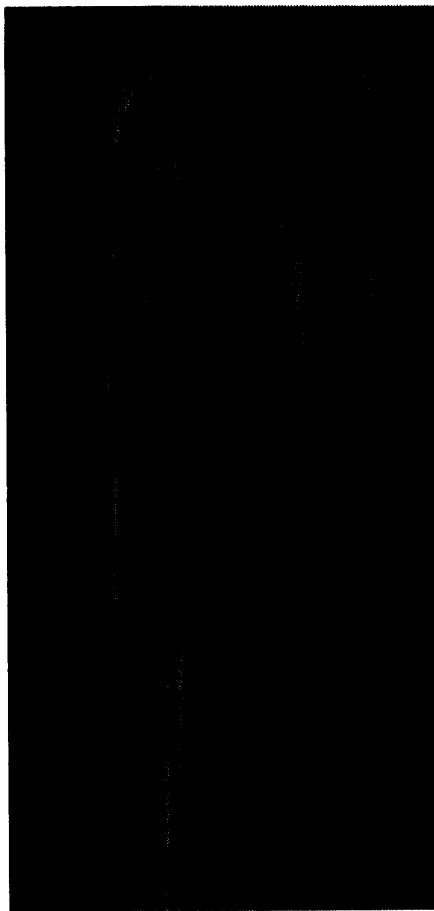
Фиг. 4. Структуры течения при различной форме нижней поверхности диска: $a - h/D = 0,1$, $f = 21$ Гц, $A = 300$ мкм, $Re_v = 12$; $b - 0,27, 300, 15$; $v - -0,1, 63, 200, 16$

В целом можно сделать вывод, что увеличение интенсивности вибраций (Re_v) при прочих равных условиях однозначно приводит к увеличению масштаба течения при сохранении его двухвихревой структуры. Во всех случаях движение жидкости происходит от кромки тела к его оси и далее вдоль оси – по направлению от тела. Стационарные структуры течения зафиксированы до значений $Re_v \cong 30$, выше этого порога наблюдалась потеря симметрии и устойчивости течения.

Влияние вязкости модельной жидкости. Для исследования подобия вибрационных течений по числу Re_v проведены эксперименты с использованием модельных жидкостей с разной вязкостью. На фиг. 3 представлены результаты моделирования вибрационных течений с близкими параметрами вибраций диска, но значительно различающейся вязкостью ($\nu = 0,01$ и $2,65$ см²/с). В обоих случаях амплитуда вибрации и отношение d/D были зафиксированы.

Сравнение структур течения показывает, что в случае более вязкой жидкости (фиг. 3,б) существенно уменьшается масштаб течения, причем энергии вибрационного воздействия достаточно лишь на образование небольших циркуляций размером 1–2 см.

Важным эффектом, наблюдаемым при переходе к более вязкой жидкости, является изменение направления движения на противоположное по сравнению со случаем $\nu = 0,01$ см²/с (фиг. 3,а). В данном случае движение происходит вдоль оси к телу и далее от центра тела к его кромкам. Особенности такого изменения структуры течения подтверждаются аналогичными изменениями структуры потоков при вибрационном воздействии кристалла в модели метода Чохральского [14], где данное явление объясняется различными механизмами передачи энергии вибраций вблизи кромок диска меридиональному течению для жидкостей с малой и большой величинами вязкости.



Фиг. 5. Структура течения при вибрациях диска с центральным отверстием: $d/D = 0,76$, $d = 31$ мм, $d_0 = 9$ мм, $A = 400$ мкм, $f = 22$ Гц, $Re_v = 22$

Влияние формы поверхности вибрирующего диска. Анализ технологических приложений вибрационного воздействия показывает, что форма вибрирующей поверхности может быть отличной от плоской. Например, фронт кристаллизации при выращивании кристаллов методами Чохральского и Стокбаргера может быть выпуклым или вогнутым в расплав, принимать более сложную W-образную форму. Возможны также модификации этих методов для выращивания трубчатых кристаллов (метод Степанова). Эти геометрические особенности обусловили проведение экспериментов по вибрациям диска с конической поверхностью (выпуклой и вогнутой), а также по вибрациям диска с центральным отверстием.

На фиг. 4 приведены структуры течения для различных форм нижней вибрирующей поверхности: коническая выпуклая ($h/D = 0,1$; а), плоская (0; б) и коническая вогнутая ($-0,1$; в). Здесь параметр h характеризует высоту конусности поверхности диска.

Сравнение структур течения для выпуклой и вогнутой поверхности (а и в) со структурой для плоского диска (б) показывает, что отклонение от плоской формы приводит к снижению порога устойчивости симметричного двухвихревого течения, наблюдаемого для плоского диска до значений $Re_v \cong 30$.

Одновременно с появлением асимметрии течение становится нестационарным, причем в случае выпуклого диска масштабы изменения вихрей со временем незначительны и асимметричная структура течения (а) в целом сохраняется. Однако в случае вогнутого диска (в) происходят заметные периодические изменения масштабов вихрей.

Структура течения для варианта плоского вибрирующего диска с центральным отверстием приведена на фиг. 5 для значения $d_0/d = 0,3$ (d_0 – диаметр отверстия). В этом случае наблюдалась асимметричная стационарная картина течения, особенностями которой являлись образование вторичного вихря вблизи центрального отверстия и его взаимодействие с одним из вихрей (в данном случае левым), вызванным вибрацией плоской поверхности диска. Это взаимодействие приводило к усилению одного из вихрей (левого) и опусканию его центра в глубину жидкости.

Установлено также, что наличие центрального отверстия повышает порог устойчивости течения. Например, асимметричная структура течения, показанная на фиг. 5, была устойчива и сохраняла стационарный характер при существенно больших значениях числа Рейнольдса ($Re_v = 62$), чем во всех ранее рассмотренных случаях. Замечено, что увеличение значения параметра d/D от 0,76 до 0,98 приводило к снижению этого порога, причем переход к нестационарной структуре течения наступил гораздо раньше (при $Re_v = 17$), что связано, по-видимому, с влиянием на течение стенок ампулы. Этот эффект имеет общий характер и обсуждался ранее для вибраций диска, не имеющего центрального отверстия.

Заключение. Представленные результаты показывают, что вибрации погруженного в жидкость диска могут вызывать достаточно интенсивные течения в цилиндрической ампуле, структура и масштаб которых поддаются эффективному динамическому управлению посредством изменения амплитудно-частотных параметров вибраций. При этом переход к колебательным режимам по Re_v в случае плоского диска при $Re_v \cong 30$ ($d/D = 0,76$) может быть существенно снижен посредством увеличения диаметра диска. Снижение порога аксиальной симметрии вибрационного течения способствует вогнутая или выпуклая в жидкость форма диска, а также наличие центрального отверстия. При этом порог перехода к колебательным режимам по Re_v несколько выше в случае выпуклой поверхности, чем вогнутой, и существенно выше для диска с центральным отверстием. Результаты экспериментов могут являться тестом при отработке математических моделей, учитывающих сложную геометрию, пространственность течения и колебания свободной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17937).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варсанофьев В.Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия, 1985. 240 с.
2. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 191 с.
3. Капустин А.П. Влияние ультразвука на кинетику кристаллизации. М: Изд-во АН СССР, 1962. 108 с.
4. Liu W.S., Wolf M.F., Elwell D., Feigelson R.S. Low frequency vibrational stirring: A new method for rapidly mixing solutions and melts during growth // J. Cryst. Growth. 1987. V. 82. № 4. P. 589–597.
5. Вибрации в технике: Справочник. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Лавендела Э.Э. М: Машиностроение, 1981. 509 с.
6. Арефьев В.Л., Лукомский С.И., Сланов А.Г., Ткаченко А.Я. Применение вибрации для интенсификации процессов перемешивания жидких сред. М: Цветметинформация, 1977. 48 с.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. О свободной тепловой конвекции в вибрационном поле в условиях невесомости // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249. № 3. С. 580–584.
8. Заварыкин М.П., Зорин С.В., Путин Г.Ф. Экспериментальное исследование вибрационной конвекции // Докл. АН СССР. 1985. Т. 281. № 4. С. 815–816.
9. Zharikov E.V., Prihod'ko L.V., Storozhev N.R. Fluid flow formation resulting from forced vibration of a growing crystal // J. Cryst. Growth. 1990. V. 99. № 1–4. P. 910–914.

10. *Jackson F.J.* Sonically induced microstreaming near a plane boundary. II. Acoustic streaming field // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1960. V. 32. № 11. P. 1387–1395.
11. *Клубович В.В., Соболенко Н.В., Толочко Н.К.* Исследование гидродинамических условий роста вибрирующих кристаллов // *Весті АН БССР. Сер. фіз.-мат. наук.* 1991. № 4. С. 49–51.
12. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М: Наука, 1974. 711 с.
13. *Верезуб Н.А., Жариков Е.В., Мьяльдун А.Э., Простомолотов А.И.* Анализ воздействия низкочастотных вибраций на температурные пульсации в расплаве при выращивании кристаллов методом Чохральского // *Кристаллография.* 1996. Т. 41. № 2. С. 354–361.
14. *Верезуб Н.А., Жариков Е.В., Мьяльдун А.Э. и др.* Исследование течения расплава при низкочастотных вибрациях кристалла в методе Чохральского // *Кристаллография.* 1996. Т. 41. № 1. С. 162–169.
15. *Гершуни Г.З., Любимов Д.В., Любимова Т.П., Ру Б.* Конвективные течения в цилиндрической жидкой зоне в высокочастотном вибрационном поле // *Изв. РАН. МЖГ.* 1994. № 5. С. 53–61.
16. *Мюллер Г.* Выращивание кристаллов из расплава: Конвекция и неоднородности. М: Мир, 1991. 149 с.

Москва

Поступила в редакцию
12.ІІ.1996