

УДК 532.574.8

© 1993 г. Е. М. ФИЛИН, В. Н. ЮРЕЧКО

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОКОНВЕКЦИИ МЕТОДОМ ФОТОХРОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Был применен метод фотохромной визуализации для исследования вибрационной конвекции в жидкостях. Даны описания экспериментальной установки и результаты наблюдения течения в прямоугольных клетках. Исследования проводились с различными амплитудами колебаний, размерами вибрирующего тела, частотами колебаний. Варьировали положение и ориентацию вибрирующего тела. Была разработана технология применения непрерывного маломощного лазерного излучения для изучения медленных течений.

1. Введение. В науке и технике все большее значение приобретает развитие технологий искусственно выращиваемых кристаллов и изучение связанных с этим физико-химических и реологических процессов [1].

Особый интерес в этом смысле представляет технология выращивания кристаллов на орбитальных станциях в условиях микрогравитации.

Исследовалось явление вибрационной конвекции. Это явление заключается в том, что если привести в соприкосновение жидкость и твердое тело, совершающее колебания малой амплитуды с частотой порядка десятков герц, то в жидкости возникает торообразное вихревое движение [2].

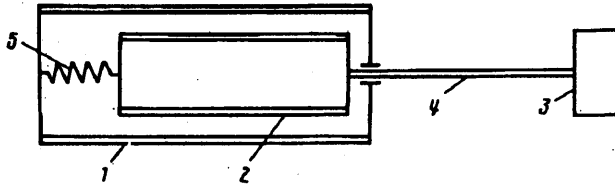
Исследование виброконвекции является очень важным предметом космического материаловедения, в частности для выращивания крист. аллоидов.

2. Экспериментальная установка. В исследованиях использовался метод фотохромной визуализации [3, 4].

Для фотоактивации фотохромной метки в исследуемом растворе использовалось излучение импульсных рубиновых лазеров ГОР-100 и газового пульсирующего лазера ЛГИ-21 с частотой пульсаций 50 Гц. Мощность газового пульсирующего лазера была меньше, но непрерывный характер его воздействия давал возможность наблюдать структуру течения. Для работы с газовым лазером увеличивалась концентрация фотохромного вещества в растворе, что уменьшало длину фотохромной метки и увеличивало ее оптическую плотность.

Регистрация течений производилась с помощью кинокамеры типа РФК-5 и видеокамеры Panasonic.

Схематически вибратор состоит из двух катушек индуктивности (фиг. 1). Вторичная катушка 2 помещена рядом с первичной 1 и скреплена с вибрационной платформой 3 с помощью стального стержня 4, вдоль которого она может смещаться, удерживаемая пружиной 5. На первичную обмотку подается периодический электрический сигнал. На вторичной катушке индуцируется ток. Взаимодействие электромагнитных полей токов первичной и вторичной обмоток приводит к тому, что виброплатформа начинает колебаться с частотой и амплитудой, определяемыми параметрами токов на обмотках. Электрический сигнал с обеих обмоток подавался на осциллограф. Ток на первичную обмотку подавался с генератора сигналов специальной формы Гб-27. Диапазон используемых частот лежал в пределах от 40 до 80 Гц. Амплитуда напряжения на вторичной обмотке вибратора менялась в пределах от 0,08 до 1,5 В. Амплитуда механических колебаний была прямо пропорциональна амплитуде колебаний напряжения. Зависимость амплитуды колебаний напряжения на вторичной обмотке от частоты



Фиг. 1

колебаний на первичной обмотке имеет резонансный характер. С изменением массы виброплатформы резонансная частота колебаний изменялась в пределах от 42 до 55 Гц. Частота механических колебаний виброплатформы измерялась с помощью строботометра ТСт 100.

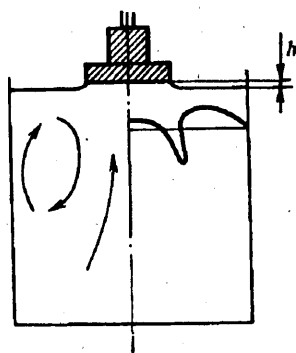
3. Эксперимент. Проводились исследования виброконвективных течений в небольших объемах (приблизительно  $100 \text{ см}^3$ ) в смеси глицерина с водой. В качестве колеблющегося твердого тела использовались металлические вибрационные платформы в виде круглых цилиндров с плоскими торцами и с диаметрами 8, 16 и 25 мм. Жидкость заливалась в прямоугольные кюветы с размерами  $5 \times 5 \times 6$  и  $10 \times 2 \times 4 \text{ см}^3$ . Амплитуды механических колебаний были порядка 0,1 мм. В наших исследованиях торец вибрационной платформы касался свободной поверхности жидкости.

Для создания тонкой и длинной метки, необходимой для построения профиля скоростей, использовался канал фотоактивации на основе твердотельного импульсного рубинового лазера ГОР-100. С целью увеличения длины метки без уменьшения ее оптической плотности фотоактивация проводилась с двух противоположных сторон кюветы. Получены кинонегативы движения метки при различных параметрах течения и по ним построены профили скоростей [3].

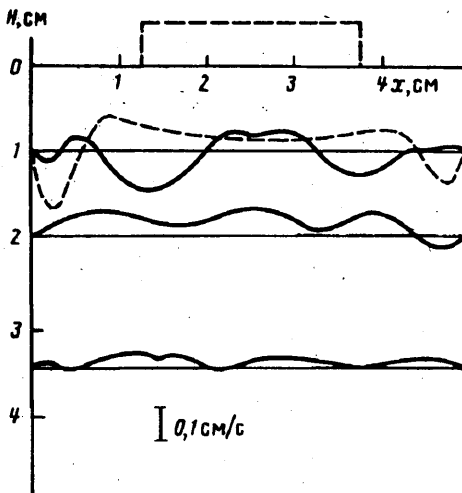
При проведении экспериментов первой задачей было обнаружить присутствие виброконвективного движения при выбранных нами параметрах движения вибратора и жидкости. В результате установлено, что виброконвективное движение присутствует лишь при определенных положениях виброплатформы относительно свободной поверхности жидкости. Расположение вибрационной платформы относительно свободной поверхности жидкости влияло на интенсивность, форму и расположение вихря очень сильно. Высоту столба жидкости, образованного за счет смачивания нижнего торца виброплатформы, обозначим  $h$  (фиг. 2). При варьировании  $h$  было обнаружено, что существует оптимальное значение, обозначаемое  $h^*$ , при котором интенсивность течения максимальна. При опускании виброплатформы вниз от положения  $h^*$  вплоть до плоскости свободной поверхности, виброконвективное движение становится очень слабым по сравнению с течением с  $h = h^*$ . Для малых  $h$  может возникнуть ситуация, когда виброконвективное течение меняет свое направление и структуру. На фиг. 2 слева схематически показано течение с измененной структурой, соответствующее значениям  $h$ , малым по сравнению с  $h^*$ , а справа показана типичная форма фотохромной метки, соответствующая этому случаю.

Отклоняя виброплатформу от горизонтального положения, получали уменьшение размеров тора с одной стороны, соответствующей утопленной части платформы, и значительное увеличение размеров тора с обратной стороны, соответствующей поднятой части платформы.

При исследованиях течения с различными положениями виброплатформы относительно свободной поверхности было замечено, что интенсивность течения сильно зависела от амплитуды механических колебаний и размеров виброплатформы; течение не менялось при изменении частоты вибраций при неизменной амплитуде напряжения на вторичной обмотке вибратора в исследуемом диапазоне частот; форма и интенсивность виброконвективного вихря зависели от степени горизонтальности расположения виброплатформы и от расстояния от виброплатформы до стенки; виброконвективный торообразный вихрь имел внутреннюю



Фиг. 2



Фиг. 3

структуру; при достаточно больших амплитудах колебаний (около 1,5 В на вторичной обмотке) на поверхности жидкости возникали стоячие волны, которые вращались вокруг виброплатформы; линейные скорости течения были максимальны в верхней части вихря около кромки виброплатформы.

Идея использования маломощного газового лазера с непрерывной пульсирующей фотоактивацией нашла применение при исследовании структуры течения. Для таких исследований требовалась повышенная концентрация фотохрома в растворе для обеспечения высокой оптической плотности фотохромной окрашенной метки и для уменьшения длины проникновения лазерного луча в раствор.

Для определения точности получаемых результатов при построении профилей скоростей была проведена серия экспериментов в статическом режиме. Получены профили скоростей жидкости, которая выдерживалась в состоянии покоя в течение фиксированного времени. На фиг. 3 сплошной линией даны профили скоростей при отсутствии контакта жидкости и виброплатформы, а пунктирной линией — профиль скоростей, когда виброплатформа касалась жидкости, но не вибрировала. Абсолютные значения скоростей малы по сравнению с величинами, соответствующими виброконвекции.

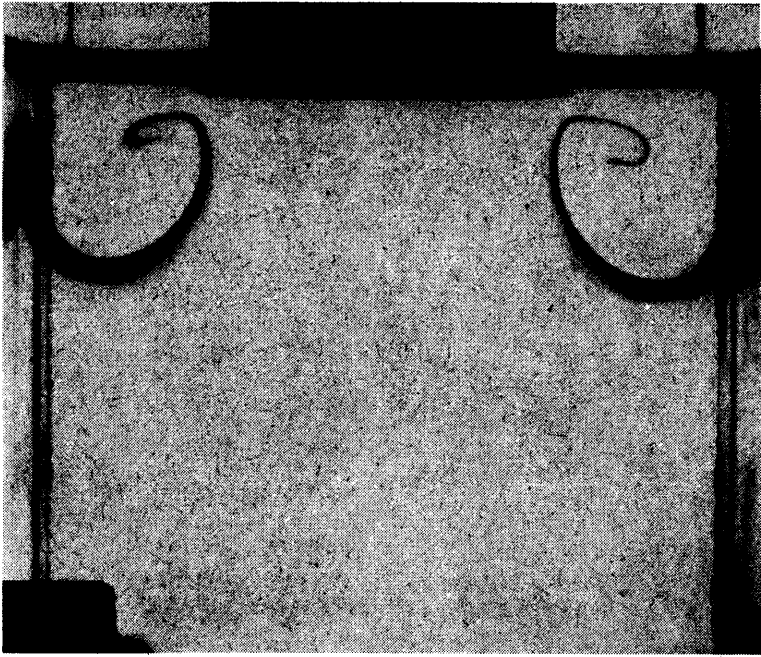
Для наиболее общего и демонстрационного описания виброконвективного течения были осуществлены съемки наиболее характерных течений в обеих кюветах — кубической ( $5 \times 5 \times 6 \text{ см}^3$ ) и узкой длинной ( $10 \times 2 \times 4 \text{ см}^3$ ).

На фиг. 4 представлена фотография визуализации течения. Использовалась непрерывная фотоактивация пульсирующим лазером с частотой пульсации 50 Гц. На фотографии видны правильные вихри, в которых окрашенная метка наматывается по спирали на торообразное кольцо, соответствующее внутренней структуре вихря.

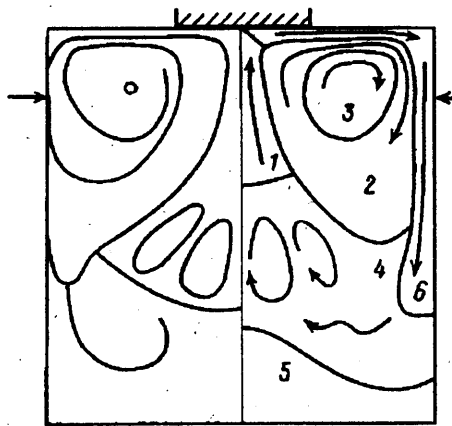
На фиг. 5 представлены результаты графической обработки кинонегатива, соответствующего фотографии на фиг. 4.

В кубической кювете не было достигнуто отрыва вихря от стенки. Поэтому проводились эксперименты в длинной узкой кювете, где виброплатформа находилась у края кюветы. На фиг. 6 представлены результаты визуализации течения в длинной узкой кювете. Фотохромная метка создавалась с помощью пульсирующего газового лазера на поверхности жидкости рядом с кромкой вибратора.

В исследуемом виброконвективном течении можно выделить следующие зоны, различающиеся по характеру течения (фиг. 5, 6): 1 — центральная (область между вихревыми зонами, соответствующая поступательному движению); 2 — вихревая наружная (та часть вихревой зоны, в которой радиальная составляющая



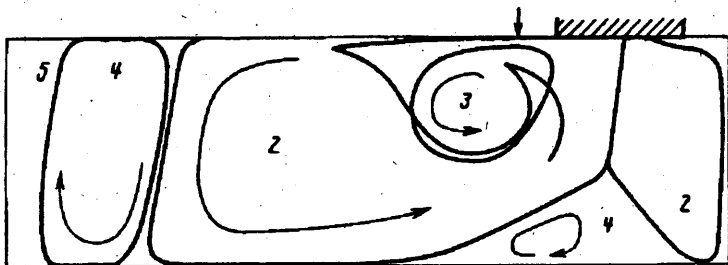
Фиг. 4



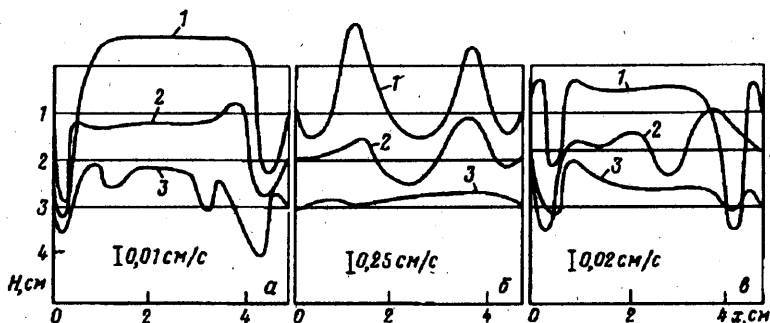
Фиг. 5

движения сравнима с азимутальной); 3 — вихревая внутренняя (часть вихревой зоны, в которой радиальная составляющая мала по сравнению с азимутальной); 4 — промежуточная (в ней присутствуют течения, слабые по сравнению с течением основного вихря, не соответствующие вращению основного вихря, присутствуют противоточные вихри); 5 — статическая (отсутствует всякое регистрируемое устойчивое движение); 6 — ламинарная (делится на пристеночную и поверхностную, имеет параболическое распределение скоростей, соответствует поступательному движению).

Как видно из эволюции вихря и из его формы, источник движения лежит на поверхности жидкости. Сдвиг на поверхности приводит к параболическому распределению скоростей в приповерхностном слое жидкости, которое потом переходит в замкнутое вихревое движение. В установившемся движении вихрь



Фиг. 6



Фиг. 7

принимает гладкие формы и приповерхностный излом в профиле скоростей исчезает. С увеличением амплитуды колебаний растут размеры вихря.

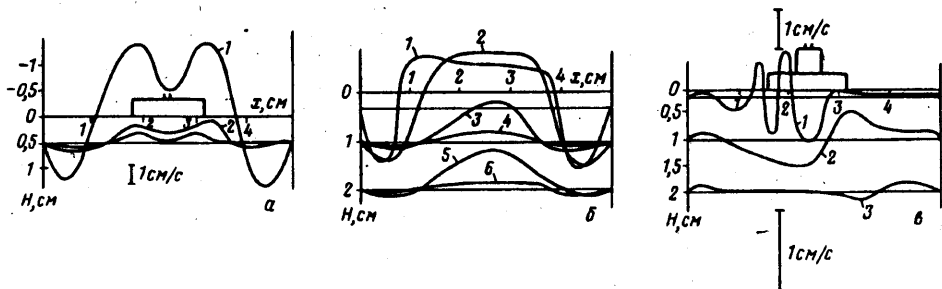
Опыты проводились в прямоугольной кювете с размерами  $5 \times 5 \times 6$  см<sup>3</sup>. Использовалась виброплатформа с наибольшим диаметром  $d = 25$  мм. Вязкость фотохромного раствора была равна  $\nu_v = 0,1$  см<sup>2</sup>/с, амплитуда напряжения на первичной обмотке вибратора  $u_1 = 3,5$  В. Строили профили скоростей, соответствующие трем частотам: одна резонансная и две другие — соответствующие дорезонансному и послерезонансному «хвостам» распределения амплитуд вибраций по частотам. Нерезонансные частоты подбирались такими, чтобы виброконвективное движение было насколько возможно слабым.

До резонанса частота колебаний  $\nu_v = 40$  Гц, амплитуда сигнала на вторичной обмотке вибратора  $u_2 = 0,09$  В. Профили скоростей такого движения представлены на фиг. 7, а. Внутри тора имеется область, где жидкость движется поступательно вверх (центральная зона). Ниже следует промежуточная область, которая соответствует границе между вихрем и застойной зоной (промежуточная зона). Под промежуточной зоной находится застойная зона, в которой движение жидкости не наблюдалось.

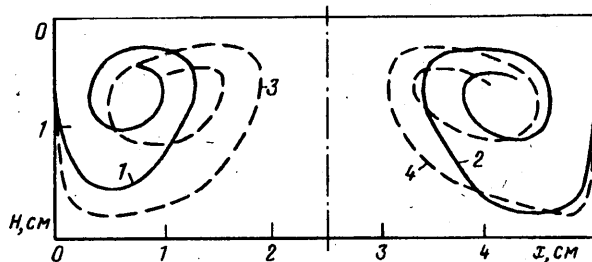
В резонансе ( $\nu_v = 57$  Гц,  $u_2 = 1,5$  В) профили скоростей представлены на фиг. 7, б. Здесь вихрь большой интенсивности, что видно из сравнения с фиг. 7, а. Движение более устойчиво, вихревая зона увеличилась в размерах, а центральная зона сузилась. На примере фиг. 7, б хорошо видно, что интенсивность вихря затухает с глубины. Основной источник движения находится у поверхности жидкости около кромок виброплатформы.

После резонанса ( $\nu_v = 80$  Гц,  $u_2 = 0,09$  В) профили скоростей представлены на фиг. 7, в. Они соответствуют профилям скоростей дорезонансной частоты.

На фиг. 7, а—в цифрами 1—3 обозначены профили скоростей, соответствующие глубинам  $h = 1; 2; 3$  см. На основании результатов, представленных на фиг. 7, а—в, можно заключить, что, во-первых, в диапазоне от 40 до 80 Гц течение принципиально не зависит от частоты вибраций при неизменной амплитуде напряжения на вторичной обмотке вибратора; во-вторых, интенсивность, устой-



Фиг. 8



Фиг. 9

чивость течения, а также размеры характерных зон сильно зависят от амплитуды колебаний.

Стробоскопическая съемка показала, что колебания виброплатформы в горизонтальной плоскости способствуют возникновению горизонтальной составляющей вращения торообразного вихря. Увеличение массы виброплатформы с диаметром  $d = 16$  мм от 2,0 до 31 г и виброплатформы с диаметром  $d = 8$  мм до 1,46 до 9,3 г позволяло избежать этого нежелательного при построении профилей скоростей эффекта. Для виброплатформы с диаметром  $d = 25$  мм и массой 18,2 г неосновная (горизонтальная) компонента вращения была мала по сравнению с основной.

Негоризонтальность при выставлении виброплатформы также способствовала увеличению неосновной компоненты вращения.

На фиг. 8, а представлены профили скоростей, соответствующие колебаниям платформы массы  $m = 2,0$  г и диаметра  $d = 16$  мм с амплитудой  $u_2 = 1,5$  В, на трех различных глубинах  $h = 0,5; 1; 2$  см. Из вида профилей скоростей видно, что в данном случае интенсивность неосновной компоненты сравнима с интенсивностью основной. Жидкость движется по спирали, наматываясь на основную окружность тора. Шаг спирали сравним с размерами основного вихря.

На фиг. 8, б представлены профили скоростей при следующих параметрах системы вибратор — жидкость:  $\nu_s = 0,085$  см<sup>2</sup>/с;  $\nu_v = 47$  Гц;  $d = 16$  мм;  $m = 31$  г; Кривым 1—3 соответствуют напряжения  $u_2 = 1,0; 0,5$  и  $0,4$  В.

На фиг. 8, в профилю скоростей 1 соответствующую глубину  $h = 0,3$  см и амплитуда колебаний  $u_2 = 0,3$  В; профилям 2—4 — глубина  $h = 1,0$  см и амплитуда колебаний  $u_2 = 1,0; 0,5; 0,3$  В; профилям 5—7 глубина  $h = 1,9$  см и амплитуда колебаний  $u_2 = 1,0; 0,5; 0,3$  В. Из фиг. 8, в видно, что с увеличением глубины меняются не только величины скоростей, но и формы профилей. Профили, соответствующие меньшим глубинам, более сжаты в центральной зоне и у них ярче выражена граница между центральной и вихревой зонами. Это является следствием распределения скоростей по направлениям.

На фиг. 9 представлены результаты графической обработки визуализации течения с параметрами  $\nu_s = 0,1$  мс<sup>2</sup>/с;  $\nu_v = 52,5$  Гц;  $h = 1$  см;  $d = 16$  мм;  $m = 16$  г. Кривым 1—4 на фиг. 9 соответствуют значения напряжений  $u_2 = 1,5; 1,0; 0,5;$

0,4 В;  $h$  — расстояние между начальным положением метки и поверхностью жидкости. С уменьшением амплитуды напряжения интенсивность вращения уменьшается.

Исследования с различными диаметрами виброплатформ показали, что размеры центральных зон больше для больших виброплатформ при тех же остальных параметрах системы вибратор — жидкость; вихревые зоны для больших платформ более прижаты к стенкам и вытянуты вниз по сравнению с аналогичными для меньших платформ; интенсивность вращения больше для больших платформ.

Проводилась серия экспериментов с изменением вязкости  $\nu$  фотохромного раствора в пределах от 0,085 до 1,6 см<sup>2</sup>/с. Регистрация производилась с помощью канала видеорегистрации. Амплитуды колебаний были  $u_2 = 0,5; 1,0; 1,5$  В. Наблюдения показали, что с увеличением вязкости уменьшались скорости движения. Из самого определения ламинарной зоны следует, что она должна расти с увеличением вязкости. Других изменений размеров зон течения зарегистрировано не было. Дальнейшее увеличение вязкости фотохромного раствора было затруднено тем, что при больших концентрациях глицерина раствор становился непрозрачным, что затрудняло видеорегистрацию и сделало невозможным кинорегистрацию.

Поскольку вихри касались стенок сосуда, можно сделать вывод, что наличие стенок влияет на течение. Были проведены опыты, в которых менялось расположение виброплатформы относительно стенок кювет. Исследования проводились как в кубической, так и в узкой длинной кюветах. С уменьшением расстояния до стенки уменьшались как горизонтальные, так и вертикальные размеры вихря и увеличивалась интенсивность вращения.

4. Заключение. Проведены наблюдения и получены качественные и количественные результаты визуализации виброконвективных течений при различных параметрах системы вибратор — жидкость. Разработана методика непрерывной фотоинициации на основе газового лазера мощности, малой по сравнению с мощностью твердотельного лазера.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что метод фотохромной визуализации оказался эффективным в применении к исследованиям виброконвекции. Несмотря на то что точность количественных данных оказалась меньше, чем у метода лазер-доплеровской спектрометрии, фотохромная визуализация позволила получать количественную и качественную информацию, недоступную другим методам исследований гидродинамических потоков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фойербахер Б., Науман Р. И., Хамахер Г. и др. Космическое материаловедение: Введение в научные основы космической технологии. М.: Мир, 1989. 478 с.
2. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава: Конвекция и неоднородности. М.: Мир, 1991. 149 с.
3. Zharikov E. V., Prihod'ko L. V., Storozhev N. R. Bulk flow phenomenon in Czochralski configuration caused by low frequency vibrations//Crystal Res. Technol. 1989. V. 24. № 8. P. 761—765.
4. Ryazantsev Yu. S., Yurechko V. N. Investigation of thermoconvective motion of liquid in enclosure by photochromic flow visualization//Acta Astronaut. 1991. V. 25. № 10. P. 659—664.
5. Юречко В. Н., Рязанцев Ю. С. К исследованию гидродинамики искусственных клапанов сердца методом фотохромной визуализации//Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 179—183.