

О ЯВЛЕНИЯХ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К НЕВЕСОМОСТИ

Р. Ф. ГАНИЕВ, В. Д. ЛАКИЗА, А. С. ЦАПЕНКО

(Киев)

Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований о динамическом поведении твердых тел, содержащих жидкость, газ и твердые частицы, выполненных в условиях невесомости при вибрационных воздействиях. Основной целью экспериментов являлось изучение устойчивых равновесных форм и динамических режимов жидких сред с газом и с твердыми включениями в условиях, близких к невесомости в вибрирующих сосудах; при этом достаточное внимание уделялось исследованию относительного движения различных фаз.

Обсуждаются два новых вибрационных эффекта, обусловленных спецификой невесомости и полученных в процессе выполнения экспериментов в условиях малой гравитации. Сущность этих эффектов заключается в интенсивном перемешивании с последующим образованием своеобразных устойчивых периодических структур (расслоения) двух несмешивающихся на Земле жидкостей с твердыми и газообразными включениями в условиях, близких к невесомости; причем эти явления имеют место при периодических (вибрационных) воздействиях на рассматриваемые многофазные среды лишь в определенном достаточно узком диапазоне частот, т. е. носят четко выраженный резонансный характер. Существенная новизна и специфика этих явлений, в отличие от очевидного ожидаемого явления перемешивания несмешивающихся на Земле сред в условиях полной невесомости, заключается в резонансности процесса перемешивания и в наличии также резонансного эффекта образования периодической структуры из многофазной среды в условиях, близких к невесомости.

Такого рода резонансные эффекты, проявляющиеся в многофазных средах в условиях невесомости при воздействии на них различных управляемых, в частности, периодических воздействий, которые на Земле практически не могут осуществляться из-за значительной величины гравитационных сил, могут быть рекомендованы к использованию при выполнении ряда технологических процессов в космосе, как например, при получении материалов с особыми физическими и механическими свойствами (пеноматериалы, композитные материалы, спецсплавы).

1. Постановка задачи и описание экспериментальной установки. Эксперименты проводились на борту летающей лаборатории — самолета, совершающего полет по кеплеровской траектории; при этом создавались условия, достаточно близкие к невесомости, когда силы поверхностного натяжения играли основную роль в формировании динамического поведения жидких сред [1-3].

С учетом специальных требований и специфики условий проведения экспериментов в Институте механики АН УССР разработана и изготовлена малогабаритная вибрационная установка для исследования динамического поведения твердых и упругих тел, содержащих различные жидкости, газ и твердые включения.

Установка позволяет создавать управляемые вибрационные воздействия, частота которых регулируется в диапазоне 7-1800 *гц*. Максимальная амплитуда колебаний нагруженного вибратора составляет ± 2 *мм*.

Установка состоит из двух блоков. Первый блок представляет собой низкочастотный усилитель УНЧ-50. Второй блок выполнен в виде контейнера с расположенными в нем малогабаритным электродинамическим вибратором, к подвижной части которого крепятся исследуемые модели; генератором синусоидальных колебаний; кинокамерой «Киев-16У» и осветителем.

2. Методика проведения экспериментов. В качестве исследуемой модели использовалась прозрачная цилиндрическая оболочка диаметром $d=50$ *мм* и высотой $h=100$ *мм*, частично заполненная водой с твердыми частицами (семенами мака) и конденсаторным маслом. Эксперименты проводились для различных соотношений уровня заполнения воды и масла.

Модель устанавливалась на вибростенде и в процессе эксперимента подвергалась вибрационным воздействиям в определенных диапазонах частот и амплитуд колебаний. Регистрация исследуемых процессов осуществлялась кинокамерой. При киносъемке процессов на пленке фиксировалась также частота внешнего возбуждения и амплитуда колебаний модели. Для этого в поле зрения объектива кинокамеры на одном уровне с оболочкой расположена шкала генератора, а на оболочке нанесена горизонтальная линия и параллельно этой линии перед оболочкой закреплена струна.

При исследованиях производилась съемка со скоростью 24 и 32 кадра в секунду. С целью выявления особенностей поведения исследуемых систем в невесомости каждый эксперимент проводился как на летающей лаборатории, так и на Земле.

Ниже приводятся некоторые результаты лишь одного из экспериментов (при этом использовалась оболочка, заполненная водой с твердыми частицами (семенами мака) до уровня $0.4h$ и маслом на $0.25h$), выполненных на летающей лаборатории.

3. Исследование процесса перемешивания. В процессе проведения наземных экспериментов на упомянутой выше модели было установлено, что на частоте внешнего возбуждения $f_b=38$ гц при ускорении стэнда $5.25g$ происходят наиболее интенсивные движения и разрушение свободной поверхности жидкости, а также низкочастотные колебания поверхности раздела вода — масло с частотой $1-2$ гц и достаточно большой амплитудой (~ 10 мм) (фиг. 1).

При уменьшении частоты внешнего возбуждения колебания поверхности раздела исчезали, хотя поведение свободной поверхности существенно не изменялось; с увеличением частоты движения как поверхности раздела сред, так и свободной поверхности прекращались и наступало почти полное успокоение системы.

Таким образом, в земных условиях, даже при максимально возможных для данного стэнда амплитудах возбуждения и во всем диапазоне частот колебаний, перемешивание воды с маслом не происходит, а наблюдается лишь частичное вспенивание масла за счет захвата капелек воды и пузырьков воздуха. Здесь интересным и заслуживающим внимания является факт возбуждения низкочастотных колебаний с большой амплитудой поверхности раздела вода — масло при сравнительно высокочастотном внешнем возбуждении.

Динамическое поведение исследуемой системы в условиях, близких к невесомости при тех же параметрах внешнего возбуждения, носило совершенно иной характер. Весь процесс можно проследить на кинограммах (фиг. 2-4). При анализе результатов экспериментов строились диаграммы (фиг. 5), отражающие характер изменения самолетной перегрузки по вертикальной оси (кривая 1), частоты внешнего возбуждения (кривая 2) и ускорения g_1 , создаваемого вибростендом (кривая 3) во времени.

На кинограмме (фиг. 2) показана гидростатика системы и ее эволюция при переходе от перегрузки к невесомости (вибрационные воздействия отсутствуют), что соответствует интервалу времени от 0 до t_1 (область I, фиг. 5). Кадры кинограммы на фиг. 3 (кадры 1-5) отражают развитие процесса перемешивания нескольких не смешивающихся сред — воздуха, масла и воды со взвешенными в ней твердыми частицами (семенами мака). На диаграммах (фиг. 5) это соответствует интервалу времени (t_1, t_3), где t_1 — момент включения вибростэнда, t_3 — момент окончания перемешивания сред.

Зарождающаяся у свободной поверхности при интенсивных колебаниях последней, вихревое движение масла за счет вязкости среды довольно быстро распространяется вглубь, достигает поверхности раздела вода — масло, разрушает ее, после чего начинается перемешивание двух жидких сред. Одновременно с этим происходит захват воздуха, находящегося над свободной поверхностью, что приводит к образованию водно-масляной суспензии.

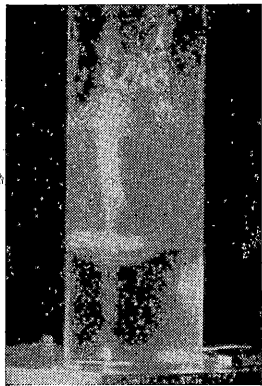
Начиная с момента t_3 при фиксированных частоте $f_b=38$ гц и амплитуде ускорения стэнда ($5.25g$) имеет место установившийся процесс хаотического движения смеси (фиг. 3, кадры 5-6; обл IV, фиг. 5). В тех экспериментах, где параметры внешнего возбуждения оставались постоянными, этот процесс продолжался до окончания режима невесомости. При этом твердые частицы, которые в начале эксперимента находились на поверхности раздела двух «несмешивающихся» жидкостей (фиг. 2), после полного перемешивания этих жидкостей «почти равномерно» распределились во всем объеме смеси (фиг. 3, кадры 5-6).

Отметим, что при изменении частоты внешнего возбуждения в окрестности 38 гц интенсивность и качество перемешивания резко ухудшается, что позволяет сделать вывод о резонансном характере процесса. В зависимости от направления изменения частоты поведение системы оказывается различным: если при уменьшении частоты в определенном диапазоне хаотический характер движения смеси сохраняется (при этом оно просто становится менее интенсивным), то с ее увеличением наблюдается качественная перестройка системы, выражающаяся в возникновении новых форм относительного движения и механического равновесия фаз.

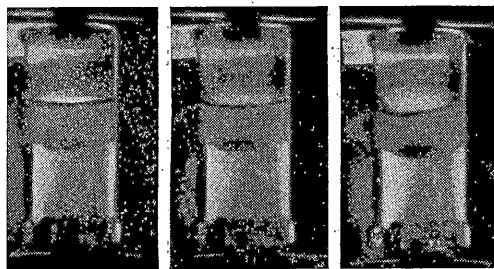
4. Эффект расслоения. В описываемом эксперименте после полного перемешивания сред частота внешнего возбуждения начала плавно увеличиваться. Интенсивность и качество перемешивания ухудшились; в отдельных местах суспензии стали появляться разрывы и уплотнения (фиг. 4, кадры 1-2).

При дальнейшем увеличении частоты возбуждения неоднородности становились все более отчетливыми и это в конечном итоге привело к образованию на частоте $f_b=44$ гц периодической структуры, представляющей собой чередование слоев суспензии и воздуха (момент времени t_5 — фиг. 5, кадр 3 — фиг. 4). В данном эксперименте образовалось три слоя суспензии с почти одинаковыми объемами.

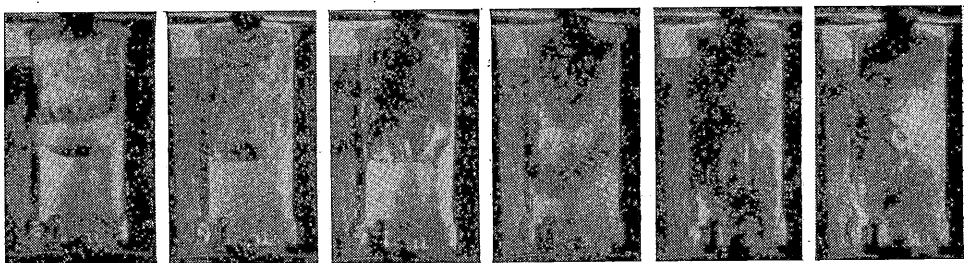
При фиксированных частоте $f_b=44$ гц и амплитуде ускорения стэнда ($5.5g$) (незначительное изменение амплитуды ускорения при увеличении частоты обусловлено параметрами стэнда) в интервале времени (t_5, t_6), т. е. до тех пор пока параметры



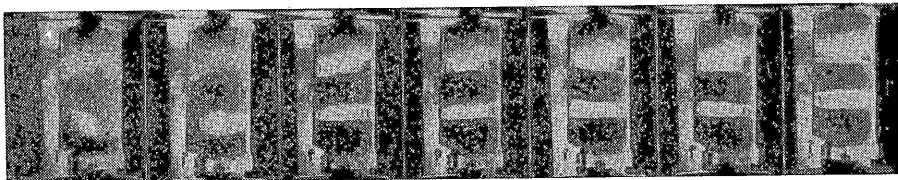
Фиг. 1



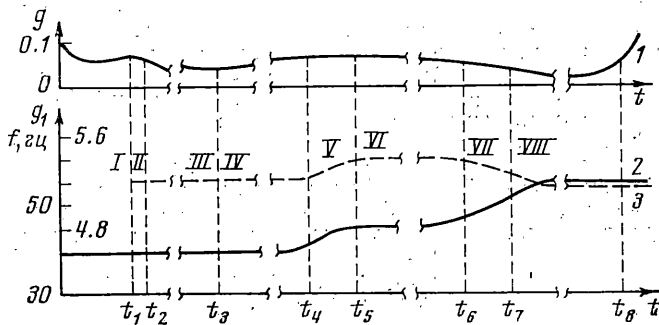
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

оставались постоянными, наблюдались незначительные колебания слоев суспензии (фиг. 4, кадры 3–6), которые, однако, не нарушали общей конфигурации структуры. Наибольшую амплитуду колебаний с частотой $f \approx 4 \text{ гц}$ имел средний слой суспензии.

Отметим также, что во всем временном интервале (t_1, t_8) самолетная перегрузка была практически постоянной. Дальнейшее увеличение частоты внешнего возбужде-

ния не нарушило расположения слоев суспензии в оболочке, а лишь привело к уменьшению амплитуды их колебаний. При достижении частоты возбуждения $f_b=54$ гц эти колебания прекратились, и неподвижное относительно оболочки состояние слоистой структуры оставалось устойчивым до окончания режима невесомости (фиг. 4, кадр 7).

При изменении частоты внешнего возбуждения в ту или иную сторону снова возникают колебания слоев, которые в конце концов приводят к их разрушению при достаточно большой расстройке частот. Таким образом, эффект периодических слоистых структур, как и процесс перемешивания, имеет резонансный характер (хотя и менее отчетливо выраженный).

Данный эксперимент был повторен несколько раз для разных соотношений уровней заполнения и типов возбуждения (продольного и поперечного). При продольном (вертикальном) возбуждении модели явление повторялось многократно; при этом частоты возбуждения, на которых происходит перемешивание и расслоение сред, были различными, в зависимости от параметров системы. Так, например, при заполнении сосуда водой до уровня $0.55 h$ и маслом $-0.2 h$ частота, на которой произошло перемешивание, оказалась равной $f_b=30$ гц, т. е. с увеличением массы жидкости она понизилась, а эффект расслоения наблюдался в диапазоне частот $\Delta f_b=37-49$ гц.

В зависимости от соотношения уровней вода — масло и общего уровня заполнения оболочки образовывалось 2—3 слоя как с одинаковым распределением суспензии в слоях, так и с различным.

В опытах по изучению возможностей перемешивания сред при поперечном возбуждении были использованы такие же сосуды и компоненты: оболочка $d=50$ мм, $h=100$ мм, заполненная водой до уровня $0.5 h$ и маслом на $0.3 h$ с твердыми частицами (семенами мака). Частота возбуждения, на которой наблюдалось перемешивание воды с маслом, составляла в этом случае $f_b=22$ гц. Интенсивность и качество перемешивания, однако, при этом были хуже, чем в случае продольных колебаний сосуда. К тому же, после повышения частоты внешнего возбуждения образование слоистой структуры суспензии не происходило.

В одном из экспериментов (вода $-0.55 h$, масло $-0.2 h$) при продольном внешнем возбуждении была создана пониженная («лунная») гравитация $-1/6 g$. В этом случае движение исследуемых жидкостей происходило аналогично земным условиям, перемешивания и расслоения не наблюдались.

Таким образом, динамическое поведение системы в зависимости от частоты внешнего возбуждения (амплитуду ускорения стенда и величину самолетной перегрузки на протяжении всего эксперимента можно считать практически постоянными) было совершенно различным; так, в окрестности частоты внешнего возбуждения $f_b=38$ гц наблюдалось установившееся хаотическое движение смеси, в то время как на частотах $f_b=44-54$ гц имела место устойчивая слоистая структура.

5. Выводы. На основе изложенного можно сделать заключение, что в отличие от наземных экспериментов, где наблюдались лишь разрушение свободной поверхности жидкости и низкочастотные колебания поверхности раздела вода — масло при определенных амплитудах и частотах возбуждения, в условиях малой гравитации происходит полное перемешивание этих сред и образование вспененной суспензии. Кроме того, в процессе экспериментов обнаружено совершенно новое явление, заключающееся в образовании устойчивой периодической структуры, представляющей собой чередование слоев суспензии и воздуха, причем твердые частицы как после перемешивания, так и в слоях суспензии располагаются почти равномерно.

Отметим также, что наиболее эффективное перемешивание несмешивающихся жидких сред, в том числе с твердыми включениями, происходит при продольных (в направлении оси симметрии) колебаниях оболочки и только на определенных частотах возбуждения для каждой конкретной модели, т. е. имеет резонансный характер.

Эффекты вибрационного перемешивания и расслоения, по-видимому, могут быть рекомендованы к использованию при разработке ряда технологических процессов в космосе, в частности для изготовления пеноматериалов, материалов, армированных какими-либо включениями а также слоистых структур, получение которых в условиях Земли затруднительно либо вообще невозможно.

Авторы искренне признательны В. Ф. Лапчинскому, А. А. Загребельному за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 14 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. М., «Машиностроение», 1974.
2. Патон В. Е., Патон В. Е., Дудко А. А. и др. Стенд для исследований технологических процессов в условиях, имитирующих космос. В сб.: Космические исследования на Украине, вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1973.
3. Патон В. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе. Автоматическая сварка, 1970, т. 5.