

УДК 532.516:534.1

© 2001 г. А.А. ИВАНОВА, В.Г. КОЗЛОВ

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ЖИДКОСТИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПОЛОСТИ

Экспериментально исследуется осредненная динамика одиночной твердой сферы в цилиндрическом слое, заполненном жидкостью и совершающем высокочастотные вращательные колебания вокруг оси симметрии. В слое имеется непроницаемая продольная перегородка, вынуждающая жидкость в целом совершать колебания вместе с полостью. Рассматриваются случаи различной ориентации кюветы в поле силы тяжести. В работе изучается действие на сферу осредненной силы вибрационной природы и зависимость этой силы от параметров вибраций, размеров и плотности тела. Измерение силы проводится по порогу "всплытия" тяжелого тела, когда осредненная вибрационная сила компенсирует и превышает действие силы тяжести.

Эффект генерации осредненной силы, действующей на твердое тело, при непостоянных колебаниях полости впервые описан в [1]. Суть явления заключается в следующем. При вращательных колебаниях полости жидкость в ней также совершает колебания. Находящееся в жидкости твердое тело в силу разности плотностей колеблется относительно жидкости. Взаимодействие тела с осциллирующим потоком приводит к генерации подъемной силы. В системе отсчета, связанной с полостью, действующая на тело осредненная результирующая сила помимо силы тяжести и указанной подъемной определяется центробежной силой и силой Кориолиса. Перечисленные силы проявляют себя во всем объеме полости, однако величина этих сил зависит от места положения тела и потому многие вибрационные эффекты сопровождаются гистерезисом.

В [1] при теоретическом описании осредненной вибрационной динамики симметричного твердого тела (цилиндра) амплитуда вибраций предполагается малой, а частота достаточно высокой. Последнее приближение позволяет пренебречь возникающими вблизи колеблющегося тела слоями Стокса и в ходе колебаний рассматривать жидкость как невязкую. Эффект левитации тяжелого тела, как показывают эксперименты [2, 3], наблюдается не только при малых, но и при больших амплитудах вибраций, т.е. при различных режимах обтекания колеблющегося в жидкости цилиндра.

При горизонтальном положении оси вибраций "всплытие" тяжелого цилиндра в коаксиальном зазоре происходит лишь тогда, когда направленная к оси вибрационная сила уравновешивает и превосходит по величине силу тяжести. Поэтому в земных условиях эксперименты ограничены величиной относительной плотности включения $\rho \equiv \rho_S / \rho_L < 3$; для подъема более плотного тела требуются настолько интенсивные вибрации, что движение тела становится хаотическим.

В случае тела сферической формы вследствие его высокой симметрии можно снизить эффективное действие силы тяжести, используя наклонное положение оси вибраций. При этом радиальная компонента силы тяжести существенно снижается, а сфера совершает колебания, опираясь на торцовую поверхность кюветы. Разумеется, такая постановка отличается от задачи о свободной частице в жидкости, находя-

щейся на большом расстоянии от границ полости, однако, сохраняя основные особенности исследуемого вибрационного эффекта, дает возможность в наземных условиях расширить интервал значений относительной плотности вплоть до $\rho \sim 10$.

В настоящей работе экспериментально исследуется динамика одиночной твердой сферы в подобных описанным в [3] условиях: в цилиндрическом слое с перегородкой, заполненном жидкостью и совершающем вращательные колебания относительно оси симметрии. Рассматриваются случаи различной ориентации кюветы в поле силы тяжести. В отличие от тела цилиндрической формы, важного в теоретическом плане, динамика сферы представляет практический интерес в силу большой распространенности такого рода включений в природе и технике.

1. Экспериментальная установка и методика. Слой образован коаксиальными цилиндрическими поверхностями, радиусы которых R_1 и R_2 (фиг. 1). Между границами слоя установлена непроницаемая продольная перегородка l , вынуждающая жидкость совершать колебания вместе с полостью. Ось вибраций n во всех опытах направлена вдоль оси симметрии слоя, ось симметрии ориентирована под углом α к вертикальной оси γ либо горизонтально.

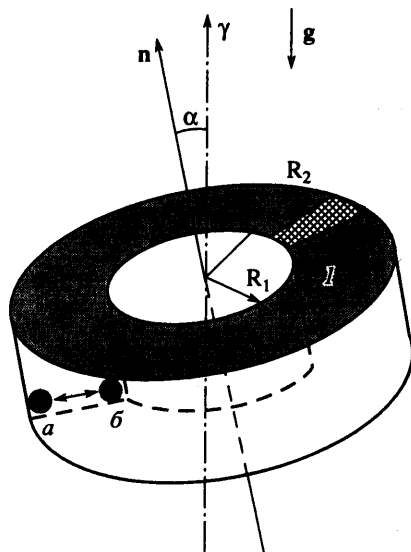
С помощью механического вибратора [3, 4] кювете сообщаются вращательные колебания с амплитудой $\varphi_0 = 0,02-0,5$ рад и частотой $f = 5-40$ Гц. Амплитуда угловых колебаний, как и угол между осью вибраций и вертикалью, измеряется с помощью оптического катетометра типа В-630 с точностью 0,001 рад. Измерение частоты проводится с помощью цифрового тахометра ТЦ-3М с точностью 0,01 Гц (нестабильность частоты вибраций в ходе отдельного опыта не превышает 0,2 Гц).

Полость с находящимся в ней телом диаметром d и плотностью ρ_s заполняется жидкостью (плотность ρ_L , вязкость ν). Наличие воздуха в полости исключается. В отсутствие вибраций тяжелое тело занимает устойчивое положение в нижней части кюветы у внешней границы (фиг. 1, а). При некотором значении угла α и заданной амплитуде φ_0 пошагово и плавно на каждом шаге повышается (понижается) частота колебаний. Динамика тела регистрируется с помощью видеокамеры. Частота, при которой происходит отрыв тела от внешней границы слоя и переход его к внутренней (фиг. 1, б), определяется как критическая (назовем этот переход тела взлетом). Порог возвращения тела в исходное положение (падение) регистрируется при постепенном снижении частоты вибраций.

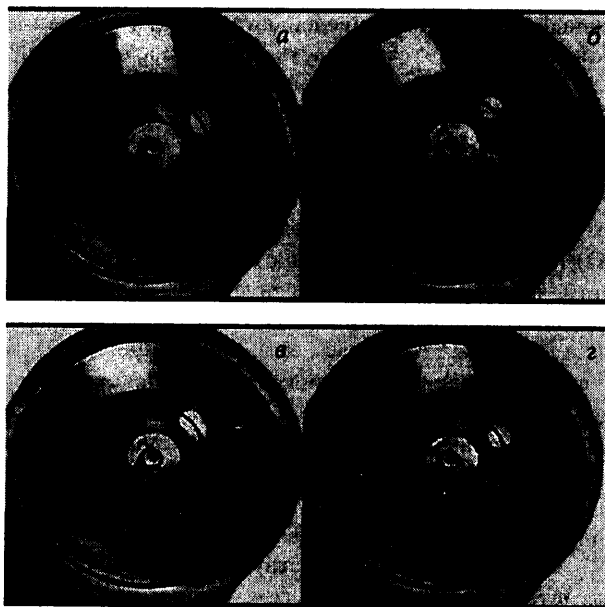
Такие серии измерений проводятся при разных значениях амплитуды вибраций φ_0 для различных углов α в интервале $\alpha = 1^\circ-9^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$. В последнем случае ось вибраций ориентирована горизонтально и постановка задачи полностью соответствует рассмотренной в [1-3].

2. Динамика сферы в редуцированном поле тяжести. Вращательные колебания полости генерируют действующую на твердое включение осредненную вибрационную силу, направленную к оси вибраций. При вертикальной ориентации оси вибрации уже малой интенсивности перемещают тяжелое сферическое тело по дну к его внутренней границе. В наклонной полости в отсутствие вибраций под действием силы тяжести сфера занимает устойчивое положение вблизи внешней границы слоя (фиг. 2, а); при вибрациях малой интенсивности она совершает колебания вдоль внешней границы (по дуге) около положения равновесия. При критическом значении интенсивности вибраций (в данном случае частоты) тело скачком переходит к внутренней границе слоя (фиг. 2, б). В таком "подвешенном" положении тело может находиться только при наличии вибраций. Возвращение сферы в исходное состояние при снижении частоты происходит также скачком и с гистерезисом.

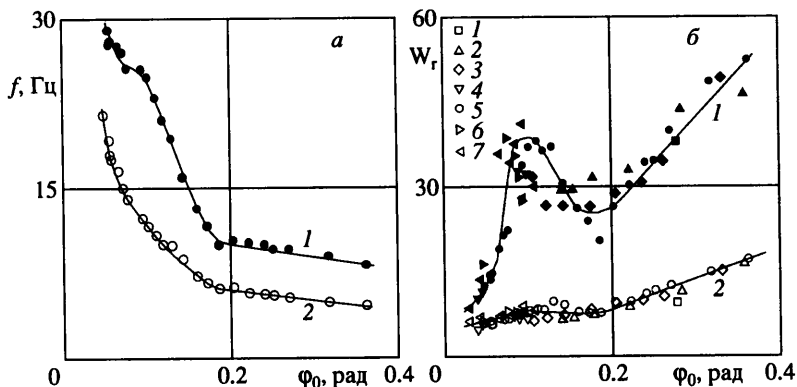
В надкритической области возможно перемещение тела из нижней точки "подвешенного" состояния (фиг. 2, б), где потенциальная энергия минимальна, вправо или влево вдоль внутренней границы слоя (фиг. 2, в и г). Величина азимутального смещения возрастает с повышением интенсивности вибраций, при этом тело приближается к расположенной в верхней части слоя перегородке. Исследование данного



Фиг. 1. Схема слоя: I – непроницаемая перегородка; a – сфера в отсутствие вибраций, b – при вибрационном воздействии в надкритической области; стрелки указывают направления переходов



Фиг. 2. Положение стального шарика при различных параметрах вибраций ($d = 9,1$ мм; масло трансформаторное; относительная плотность $\rho = 8,92$; угол наклона оси вибраций $\alpha \sim 0,1$ рад)



Фиг. 3. Кривые взлета (1) и падения (2) стального шарика ($d = 9,1$ мм) в масле трансформаторном при $\sin \alpha \sim 0,03$ (а) и б – $\sin \alpha = 0,148; 0,087; 0,054; 0,030; 0,029; 0,020$ и $0,018$ (1–7); темные точки соответствуют взлету, светлые – падению

явления выходит за рамки настоящей работы, где основное внимание уделяется именно пороговым переходам плотной сферы от одной границы к другой.

При заданной амплитуде угловых колебаний Φ_0 критическая частота, при которой происходит переход тела к верхней границе слоя, и критическая частота возвращения тела к нижней границе имеют различные значения. На фиг. 3, а в размерном виде показаны пороговые кривые взлета 1 и падения 2 стальной сферы в масле трансформаторном (основные параметры приведены в таблице). С увеличением амплитуды обе кривые монотонно понижаются; область гистерезиса, как видно, имеет значительные размеры.

Рассмотрим безразмерные параметры, определяющие динамику сферического тела в редуцированном поле тяжести. Перемещение тяжелого тела в противоположную сторону вызвано направленной к оси вращения вибрационной силой, которая в надкритической области по величине превышает силу тяжести. Определенный по среднему радиусу кривизны слоя $R_0 = (R_1 + R_2)/2$ вибрационный параметр [1] $W_r = (\Phi_0 \Omega)^2 R_0 / g \sin \alpha$ характеризует отношение вибрационной силы к компоненте силы тяжести, действующей вдоль радиуса.

При изменении угла α форма критических кривых и глубина гистерезиса изменяются, однако в целом эффект сохраняет свои черты (фиг. 3, б). Критические кривые, построенные при различных значениях α , на плоскости Φ_0, W_r удовлетворительно согласуются друг с другом. Кривая взлета 1 с увеличением амплитуды вибраций образует выраженные максимум при амплитуде $\Phi_0 \approx 0,1$ рад и минимум при $\Phi_0 \approx 0,2$ рад, и далее быстро нарастает. Кривая падения 2 проходит сравнительно плавно.

Тот факт, что при различных α точки удовлетворительно согласуются между собой на плоскости Φ_0, W_r (фиг. 3, б), свидетельствует, во-первых, о правильном выборе вибрационного параметра W_r , во-вторых, о том, что действие торцевой границы полости, вдоль которой скользит тело, в данном случае не является принципиальным. Разброс точек вдоль кривой 1 объясняется гистерезисным характером и вследствие этого сильной зависимостью порога от случайных возмущений. Это связано с тем, что в области гистерезиса, между кривыми, тело может занимать устойчивое положение как у верхней, так и у нижней границы полости. Вследствие этого вибрации самой установки, вызванные, например, резонансными колебаниями рамы вибратора, могут спровоцировать подъем тела практически при любом значении W_r выше кривой 2.

№ серий	Тело	d, мм	Жидкость	ρ_L , г/см ³	v, Ст	ρ_S , г/см ³	R_0 , мм	d/h	sin α
1	Сталь	9,1	Масло трансформаторное	0,874	0,24	8,92	42,9	0,42	0,029
2	ПХВ	4,2	Вода	1	0,01	1,40	37,4	0,34	0,105
3	Стекло	4,0	»	1	0,01	2,65	37,4	0,32	0,105
4	Сталь	4,0	»	1	0,01	7,80	37,4	0,32	0,105
5	»	4,0	FC-40	1,85	0,02	4,22	37,4	0,32	0,105
6	»	4,0	Масло растительное	0,91	0,49	8,57	37,4	0,32	0,096
7	Стекло	4,0	То же	0,91	0,49	2,91	37,4	0,32	0,093
8	»	4,0	FC-40	1,85	0,02	1,43	35,3	0,27	0,093
9	Сталь	4,0	»	1,85	0,02	4,22	35,3	0,27	0,093
10	»	7,1	»	1,85	0,02	4,22	35,3	0,47	0,093
11	Стекло	4,0	»	1,85	0,02	1,43	35,3	0,27	1
12	ПХВ	4,2	Смесь водоглицериновая	1,21	0,45	1,16	35,3	0,28	1
13	Сталь	4,0	То же	1,21	0,45	6,45	35,3	0,27	0,093
14	»	3,15–12,7	Вода	1	0,01	7,80	42,9	0,42	0,022
15	»	3,15–9,2	Масло растительное	0,91	0,50	8,58	42,9	0,42	0,033

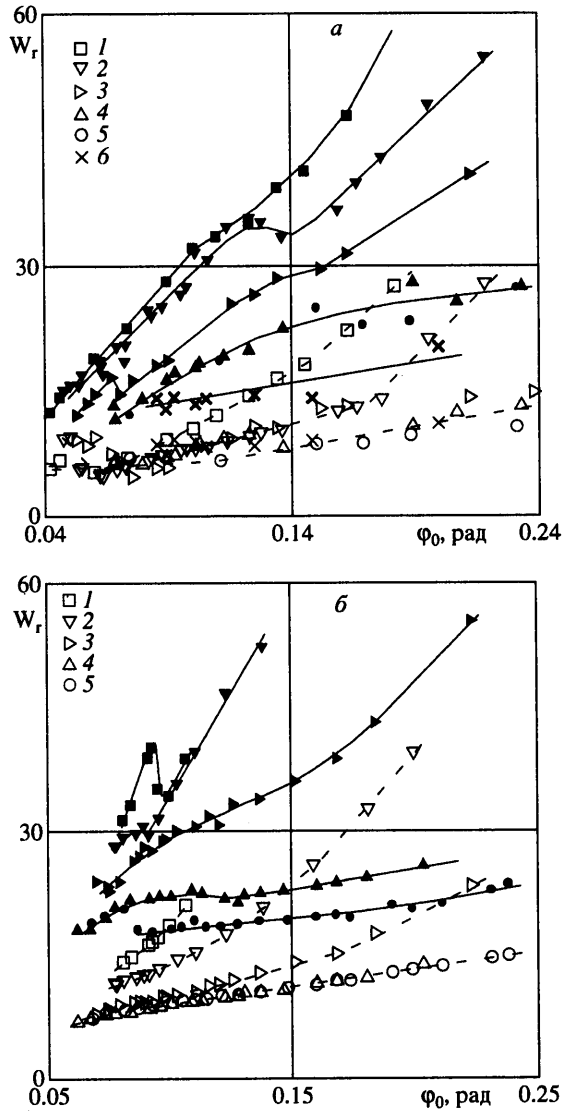
Для снижения уровня такого рода возмущений вибратор был укреплен на бетонном фундаменте.

Возмущения, связанные с недостаточной чистотой обработки поверхности кюветы и тела, также приводят к сглаживанию экстремума на пороговой кривой взлета. При этом кривая взлета опускается, кривая падения приподнимается, область гистерезиса становится меньше. Действие возмущений, вызванных соударениями тела с границами полости, проявляется особенно сильно как в области самых малых амплитуд (больших вибрационных ускорений), так и в области больших амплитуд. И в том, и в другом случае в результате соударений тело находится в непрерывном хаотическом движении, а в критическом состоянии совершает переходы от одной границы полости к другой, не позволяя идентифицировать границы кризиса.

Если говорить о физической природе гистерезиса, то, как показано в [1], гистерезис объясняется зависимостью осредненной вибрационной силы от расстояния между телом и осью вращения (вибраций). В цилиндрическом слое уменьшение расстояния до оси приводит к усилению вибрационного эффекта. В то же время нельзя исключить осредненное взаимодействие колеблющегося тела со стенками полости, что также может внести вклад в явление гистерезиса.

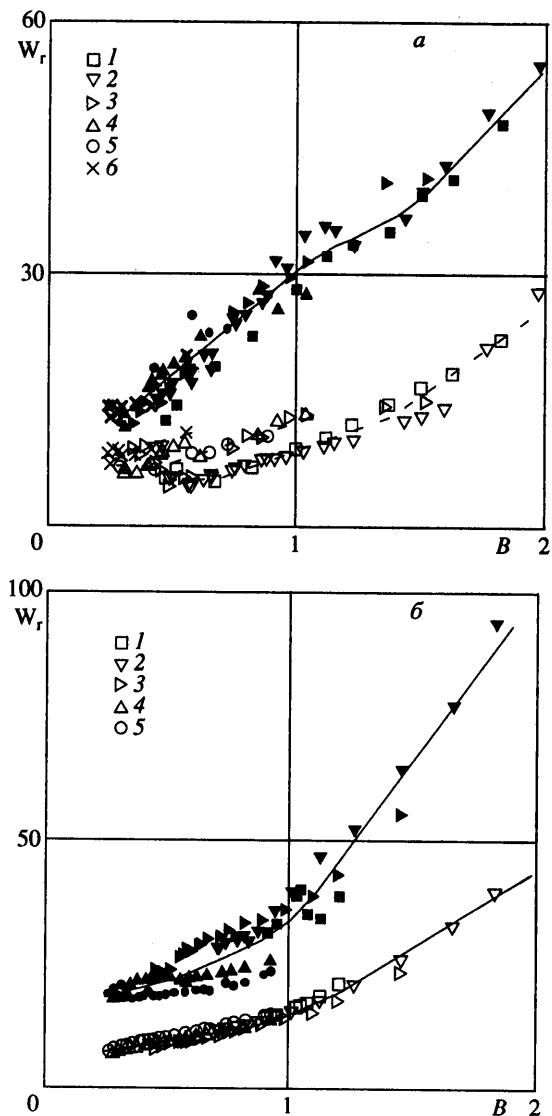
В соответствии с [1] параметр W_r является определяющим в предельном случае малых амплитуд $\varphi_0 \ll 1$ и высоких частот вибраций $\omega \equiv \Omega d^2/\nu \gg 1$ при безотрывном невязком обтекании колеблющегося тела (ν – кинематическая вязкость жидкости). Реализованный в настоящем эксперименте диапазон частот $f = 5\text{--}40$ Гц соответствует достаточно высокой безразмерной частоте ω (для трансформаторного масла и тела диаметром 9 мм частота принимает значения $\omega = 100\text{--}1000$). В то же время амплитуда вибраций изменяется в широком диапазоне и не является малой, а вибрационный эффект, как показывают опыты, существенно определяется именно амплитудой вибраций, а точнее, амплитудой колебаний самого тела в жидкости. Поскольку мерой амплитуды таких колебаний является, очевидно, диаметр тела, представляется важным исследование зависимости рассматриваемого эффекта от размера тела.

3. Роль размера тела. Исследования проводятся с телами разного диаметра, но одинаковой плоскости (стальные шары от шарикоподшипников). Проведенные на воде и растительном масле (таблица) опыты показывают, что независимо от размера плотной сферы ее динамика сохраняет описанные выше характерные черты. Переход к внутренней границе (взлет) и возврат в исходное положение (падение) происходят пороговым образом и с гистерезисом.



Фиг. 4. Кривые взлета (темные точки) и падения (светлые) при постоянной относительной плотности: сталь – вода (а), сталь – растительное (б); d , мм = 3,15 (1); 3,9 (2); 5,5 (3); 7,9 (4); 9,2 (5) и 12,7 (6); $\sin \alpha \approx 0,03$

Границы переходов тела в случае воды (фиг. 4, а) и в более вязкой жидкости – растительном масле (фиг. 4, б) на плоскости ϕ_0, W_r ведут себя похожим образом: с повышением амплитуды вибраций величина критических значений параметра W_r возрастает. Что касается зависимости границ от размера тела, то чем меньше диаметр, тем выше пороговые кривые и взлета, и падения. Из фиг. 4 следует, что при фиксированной амплитуде угловых колебаний ϕ_0 для поднятия тела большего размера требуются вибрации заметно меньшей интенсивности. В данном случае в отличие от рассмотренного на фиг. 3, б особенности на кривых взлета в виде экстремумов отсутствуют.



Фиг. 5. Кривые взлета и падения на плоскости безразмерных параметров B и W_r (обозначения соответствуют фиг. 4)

Анализируя вид критических кривых, воспользуемся результатами [2, 3], где показано, что вибрационный эффект существенно определяется амплитудой колебания тела в жидкости, которая в свою очередь определяет режим обтекания колеблющегося тела. Для характеристики относительной амплитуды колебаний тела сферической формы можно использовать, следуя [3], параметр $B = ((\rho - 1)/(\rho + 0,5))R_0\phi_0/d$.

Параметр B пропорционален амплитуде колебаний полости: $B = k\phi_0$, где k – постоянная, зависящая от относительной плотности, размеров тела и слоя. Здесь в качестве амплитуды смещения тела относительно жидкости используется теоретическое значение $((\rho - 1)/(\rho + 0,5))R_0\phi_0$, справедливое для сферы сравнительно малого размера $d \ll R_2 - R_1$, колеблющейся в средней части слоя с малой амплитудой при невязком характере ее обтекания, т.е. в пределе высоких безразмерных частот $\omega \gg 1$.

На фиг. 5 на плоскости безразмерных параметров B , W_r приведены пороговые

точки, соответствующие результатам, представленным на фиг. 4 (обозначения те же). На данной плоскости параметров границы, полученные в экспериментах с телами разного размера, удовлетворительно согласуются между собой в пределах одной относительной плотности, будь то опыты с водой или маслом. В случае воды (фиг. 5, *a*) пороговые кривые взлета (темные точки) и падения имеют большой разброс, который можно объяснить соударениями тела со стенками полости. В масле (фиг. 5, *б*) в силу его большей вязкости движение тела происходит спокойнее, при этом светлые точки, отмечающие границу падения, хорошо группируются вблизи единой кривой.

Рассмотрим возможные причины расслоения кривых. При высокой безразмерной частоте вибрационная сила зависит от расстояния тела до оси вращения, что и объясняет гистерезис (чем меньше расстояние, тем выше значение вибрационной силы). Это должно приводить к тому, что сферы большего размера будут взлетать при меньшем значении W_r (падать при большем), чем тела меньшего размера, поскольку вблизи границ слоя положение центра масс тела определяется его радиусом. Вследствие этого область гистерезиса тем меньше, чем больше размер тела (в одной и той же полости). Сказанное объясняет монотонное смещение вверх границы падения тел при увеличении их размера (фиг. 5, *a*). На границе взлета, на данной фигуре, расслоение не так заметно в силу большого разброса точек, вызванного, как отмечалось, соударениями. Расслоение становится более наглядным в вязкой жидкости, для которой характерно "спокойное" поведение тел, особенно на кривой взлета (фиг. 5, *б*). На кривой падения расслоение также присутствует, хотя и не столь заметно в выбранном масштабе.

Сравнение представленных на фиг. 4 и 5 результатов убедительно свидетельствует о том, что параметр B , характеризующий относительную амплитуду колебаний тела в жидкости, является одним из определяющих безразмерных комплексов при описании вибрационной динамики твердых тел. Напомним, что в параметр B входит теоретическое значение амплитуды смещения тела относительно жидкости, рассчитанное при ряде предположений.

Сравнение фиг. 3, *б* (здесь $B \cong 4\phi_0$) и 5, *б* показывает удовлетворительное согласие результатов на плоскости B, W_r области $B > 0,8$. Существенным отличием является лишь экстремум в интервале $B \approx 0,2-0,8$ на кривой взлета (фиг. 3, *б*). О природе экстремума речь пойдет ниже, а его отсутствие в опытах с растительным маслом (фиг. 5, *б*) может быть связано с наличием в данных экспериментах неконтролируемых возмущающих факторов. Об этом свидетельствует, в частности, заметное снижение кривых взлета в случае тела большого диаметра (фиг. 5, *б*, точки 4 и 5).

Остановимся на природе и уровне возмущений, испытываемых телом в условиях настоящего эксперимента. В наклонной полости, т.е. в редуцированном поле силы тяжести, до взлета сфера опирается на торцовую и боковую стенки. Взаимодействие с двумя стенками существенно. Кроме того, это взаимодействие зависит от режима обтекания колеблющейся сферы, что в свою очередь связано с интенсивностью вибраций и свойствами окружающей сферу среды. После "взлета", в надкритической области, и вплоть до падения сфера опирается только на торцовую границу. Поэтому кривые падения, как правило, менее чувствительны к неконтролируемым возмущениям (фиг. 5, *б*, светлые точки). Исключение составляют маловязкие жидкости, когда в результате упругих соударений со стенками полости тело в любом положении совершает заметные хаотические колебания (фиг. 5, *a*, светлые точки).

Анализируя особенности на кривой 1 (фиг. 3, *б*), где имеется область понижения устойчивости в интервале амплитуд вибраций $\phi_0 = 0,1-0,2$, вновь обратимся к опытам с цилиндрическим телом в полости той же геометрии. В [3] на кривой взлета также наблюдается аномалия, но более выраженная, когда в узком интервале амплитуд вибраций критическое значение вибрационного параметра возрастает настолько, что достижение его становится невозможным. Эта особенность характерна для той области параметров, где происходит смена режима обтекания колеблющегося цилиндра —

слева от экстремума (малые значения B) обтекание ламинарное и безотрывное, справа – турбулентное.

Сказанное позволяет предположить, что в случае тела сферической формы сложный вид критических кривых в области $B = 0,2-0,8$ также может быть связан с переходом к отрывному режиму обтекания колеблющейся сферы. Поскольку перед взлетом тело совершает колебания в непосредственной близости от нижней границы, изменение режима обтекания сферы должно проявляться в изменении гидродинамического взаимодействия со стенкой полости.

Предположение о смене режима обтекания в случае увеличения B качественно согласуется с результатами [5], где отмечается возникновение отрыва потока от внезапно приведенной в движение сферы при прохождении пути $L/d \sim 0,2$ (d – диаметр сферы). В [6, 7] экспериментально и теоретически показано, что устойчивость течения вблизи колеблющегося в жидкости тела определяется двумя безразмерными параметрами: частотой $\omega \equiv \Omega d^2/\nu$, характеризующей отношение размера тела к толщине слоя Стокса, и отношением амплитуды b колебания тела в жидкости к его диаметру, а точнее, критическим значением комплекса этих параметров $(b/d)\omega^{1/4}$.

Из экспериментов [6] с телами цилиндрической формы следует, что в предельном случае высоких частот данный комплекс определяет не только устойчивость осредненного течения, но и переход осциллирующего течения жидкости вблизи колеблющегося тела к отрывному и далее – к турбулентному режиму. Анализ устойчивости осредненного течения, возбуждаемого шаром диаметром d , вибрирующим с амплитудой b в неподвижной жидкости, проведенный в [8] в приближении малых амплитуд и высоких частот вибраций, показывает, что неустойчивость наступает при критическом значении комплекса $(b/d)\omega^{1/4} = 2,45$.

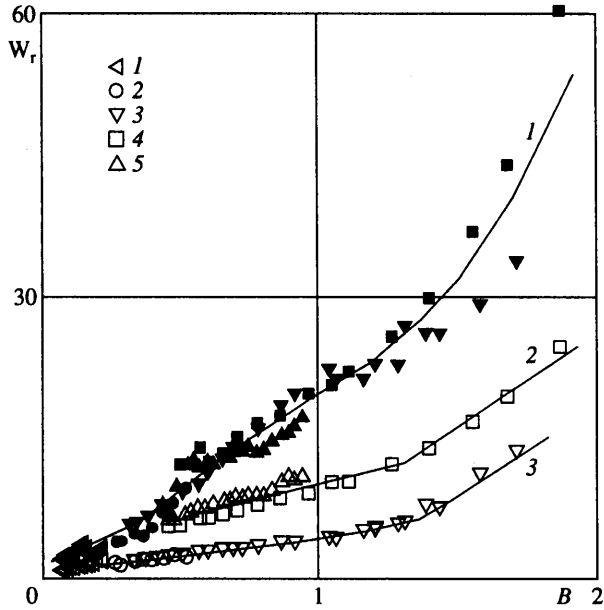
В рассматриваемой задаче переходной области амплитуд $\varphi_0 = 0,1-0,2$ (фиг. 3, a) соответствует интервал значений комплекса $B\omega^{1/4} = 1,7-3,5$, что вполне согласуется с результатами [8]. Это означает, что структура и характер осредненного движения, возбуждаемого самим колеблющимся телом, равно как и режим обтекания, играют немаловажную роль в эффекте вибрационного взаимодействия осциллирующего тела с границами полости.

4. Роль относительной плотности включений. Исследования проводятся со сферами близкого размера ($d \cong 4$ мм), изготовленными из различающихся плотностью материалов: полихлорвинила (ПХВ), стекла, стали. В качестве жидкости используются трансформаторное и растительное масла, вода, водоглицериновая смесь и флуоруглерод (флуоринерт FC-40). Основные характеристики тел, жидкостей и слоя приведены в таблице.

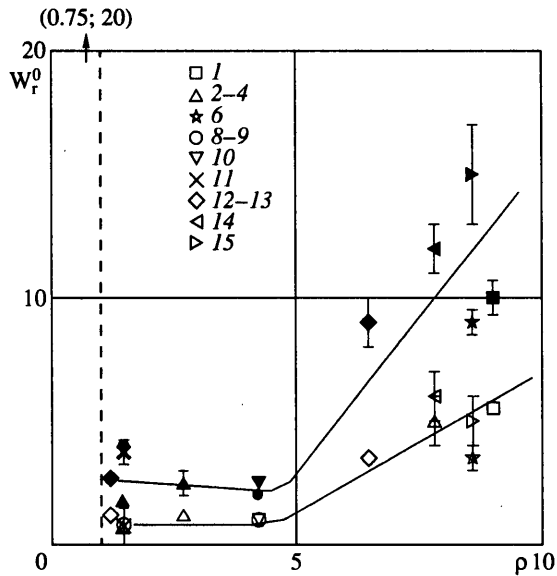
Критические значения вибрационного параметра W_r , соответствующие одинаковым амплитудам вибраций, по мере понижения относительной плотности уменьшаются, т.е. чем меньше относительная плотность тела (которая, однако, остается больше единицы), тем меньше пороговое значение частоты при заданной амплитуде вибраций. Это означает усиление вибрационного эффекта. Поэтому в случае стеклянной сферы во флуоринерте (относительная плотность $\rho \cong \rho_s/\rho_L = 1,43$) взлет тела можно наблюдать как в редуцированном поле тяжести, $\sin \alpha \sim 0,1$, так и при горизонтальном положении оси вибраций, когда $\sin \alpha = 1$.

Хорошее согласие критических значений, полученных в столь различных условиях, лишний раз подтверждает правильный вид используемого параметра W_r и его определяющую роль при произвольном положении оси вибраций.

На фиг. 6 в виде зависимости $W_r(B)$ приведены критические кривые для различных значений относительной плотности ρ (обозначения 1–5). Кривые взлета удовлетворительно согласуются (кривая 1). Однако значения параметра W_r , полученные методом экстраполяции критических кривых на значение $\varphi_0 = 0$, различаются и достаточно сильно.



Фиг. 6. Кривые взлета (темные точки) и падения (светлые) в зависимости от относительной плотности ρ : $\rho = 1,40$ (1), 2,65 (2), 4,22 (3); 6,45 (4) и 8,57 (5); вода (1, 2), флуоринерт (3), водоглицериновая смесь (4) и масло растительное (5); $d = 4,2$ (1) и 4 мм (2-5); $\sin \alpha \sim 0,1$



Фиг. 7. Зависимость от относительной плотности ρ критического значения вибрационного параметра W_r^0 , полученного методом экстраполяции кривых взлета и падения на значение амплитуды вибраций $\phi_0 = 0$; нумерация точек соответствует номерам строк в таблице

Кривые падения (светлые точки) на плоскости B, W_r испытывают заметное расщепление. Не исключено, что это вызвано не столько различием тел по плотности, сколько различием жидкостей. Так, соответствующие жидкостям с малой вязкостью (вода, флуоринерт) границы (кривая 3) находятся заметно ниже, чем полученные в масле и водоглицериновой смеси (кривая 2), вязкость которых в десятки раз выше. В этой связи необходимо вспомнить о важной роли безразмерного параметра ω , определяющего характер вязкого взаимодействия колеблющегося тела и жидкости.

При значительном увеличении вязкости (при снижении безразмерной частоты до значений $\omega \sim 1$) опыты обнаруживают качественное изменение вибрационного эффекта – переход тяжелого тела от внешней границы слоя к внутренней происходит не скачком, а мягко. Когда интенсивность вибраций достигает критического значения, тело плавно поднимается над дном полости (над внешней границей слоя при горизонтальном положении оси вибраций) и занимает устойчивое положение в средней части слоя. С повышением интенсивности тело монотонно приближается к внутренней границе слоя, с понижением интенсивности оно также постепенно опускается на дно; при этом гистерезис отсутствует.

Сопоставление экспериментальных данных по относительной плотности проводится в пределе малых амплитуд вибраций (фиг. 7, числовые обозначения точек соответствуют номерам строк таблицы). Критические значения параметра W_r^0 определяются методом экстраполяции кривых взлета и падения на значение $\varphi_0 = 0$. Результаты получены в опытах с телами разного относительного размера и на жидкостях различной вязкости. Эти параметры, как показано выше, существенно определяют глубину гистерезиса и положение критических кривых. Большие доверительные интервалы некоторых точек на графике обусловлены погрешностью экстраполяции критических кривых из-за их сложного вида в области малых амплитуд. Несмотря на связанный с этим большой разброс значений W_r^0 , график позволяет сделать выводы о зависимости вибрационного параметра от относительной плотности.

В исследованном диапазоне чисел ρ (для сравнительно высоких значений безразмерной частоты) характер вибрационного эффекта не изменяется: переход от одной границы полости к другой происходит скачком, в переходах наблюдается гистерезис. Вибрационный параметр W_r^0 слабо изменяется с увеличением ρ в области $\rho < 5$ и быстро нарастает при $\rho > 5$; при этом увеличивается и область гистерезиса. Таким образом, увеличение относительной плотности в целом приводит к ослаблению вибрационного эффекта (к возрастанию параметра W_r^0), что качественно согласуется с результатами теоретического анализа [1].

Эксперименты с твердым телом, относительная плотность которого меньше единицы, например сфера из пробки или из пенопласта в воде, сфера из ПХВ во флуоринерте, в исследованном интервале вибрационных параметров не обнаружили явления перемещения к внутренней границе слоя (фиг. 7, обозначение в виде стрелки). В ходе вибраций легкое тело совершает колебания вблизи внешней границы слоя (при этом перегородка находится внизу, в противоположной от всплывшего тела стороне). В то же время динамика легкого тела отличается от динамики газового включения, которое в аналогичных условиях тонет, перемещаясь по вертикали от внешней границы слоя к внутренней [9].

Кратко остановимся на другом осредненном эффекте, который заключается в азимутальном смещении тела (фиг. 2, α и γ). Эффект имеет пороговый характер и наблюдается при больших амплитудах вибраций и больших вибрационных ускорениях. Смещаясь под действием вибраций в ту или другую сторону от вертикальной осевой плоскости, тело занимает устойчивое среднее положение на наклонном или

даже вертикальном участке цилиндрического слоя (для простоты описывается случай горизонтального положения оси). Это явление наблюдается независимо от эффекта радиального перемещения тела. Отклоняясь от вертикального осевого сечения, тяжелое тело удаляется от нижней точки полости; азимутальное перемещение возможно как вдоль внешней границы цилиндрического слоя (до "взлета"), так и вдоль внутренней.

Что касается легкого включения $\rho < 1$, то при горизонтальном положении оси вибраций тело любой формы, сферической или цилиндрической, под действием вибраций перемещается, опускаясь, но всегда остается вблизи внешней границы слоя.

Эффект азимутального перемещения тел, как показывают наблюдения, не связан с взаимодействием тела со стенками полости за счет соударений или сил сухого трения. По мере повышения интенсивности вибраций тело смещается на все больший угол и в конце концов приближается к перегородке. Несомненно, что в непосредственной близости от перегородки проявляется гидродинамическое взаимодействие тела с перегородкой (притяжение). Однако азимутальное перемещение тел наблюдается и в относительно тонких слоях $R_1/R_2 \sim 0,9$, когда расстояние от колеблющегося тела до перегородки превышает толщину слоя в десятки раз, а ближнее взаимодействие тела с перегородкой, очевидно, отсутствует. Это подталкивает к мысли, что в данном случае имеет место эффект Челомея [10] – перемещение тела в вибрирующей полости в направлении, противоположном действию статического поля тяжести, и нуждается в дальнейшем изучении.

Закключение. Если плотное тело находится в заполненном несжимаемой жидкостью и совершающем высокочастотные вращательные колебания цилиндрическом слое с перегородкой, то независимо от формы тела на него действует осредненная вибрационная сила, конкурирующая с силой тяжести. Важной особенностью этой силы является то, что она действует во всем объеме полости, а эффект левитации не ограничен случаем предельно малых амплитуд колебаний, поскольку проявляется как при ламинарном, так и при турбулентном режиме обтекания колеблющегося тела. Из безразмерных параметров помимо относительной плотности $\rho = \rho_S/\rho_L$, относительных размера полости h/R_0 и тела d/h определяющими являются вибрационный параметр $W_r \equiv (\varphi_0 \Omega)^2 R_0/g \sin \alpha$, безразмерная амплитуда колебаний тела B и безразмерная частота $\omega \equiv \Omega d^2/\nu$.

Из вида вибрационного параметра W_r следует, что в случае слабых статических полей этот параметр принимает большие значения уже при слабом вибрационном воздействии, что делает вращательные вибрации эффективными для разделения фаз в условиях микрогравитации.

Авторы выражают признательность Российскому фонду фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00416) за поддержку этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov V.G. Solid body dynamics in cavity with liquid under highfrequency rotational vibration // Europhys. Letters. 1996. V. 36. № 9. P. 651–656.
2. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Evesque P. Solid body mean dynamics at large amplitude rotational vibrations: Experiments // Proc. Joint 10th Europ. and 6th Russian Symp. on Phys. Sci. in Microgravity. St. Petersburg. Russia, 1997. Moscow: Inst. Probl. Mech. RAS, 1997. V. 1. P. 266–269.
3. Иванова А.А., Козлов В.Г., Эвеск П. Динамика цилиндрического тела в заполненном жидкостью секторе цилиндрического слоя при вращательных вибрациях // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 4. С. 29–39 = Ivanova A.A., Kozlov V.G., Evesque P. Dynamics of a cylindrical body in a liquid-filled sector of a cylindrical layer under rotational vibration // Fluid Dynamics. 1998. V. 33. № 4. P. 488–496.

4. *Иванова А.А., Козлов В.Г.* Экспериментальное исследование влияния крутильных колебаний на устойчивость конвективного движения в вертикальном цилиндрическом слое кругового сечения с перегородкой // Конвективные течения / Под ред. Е.М. Жуховицкого. Пермь: Изд-е Перм. пед. ин-та, 1987. С. 38–43.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
6. *Sarpkaya T.* Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan – Carpenter numbers // J. Fluid Mech. 1986. V. 165. P. 61–71.
7. *Hall P.* On the stability of unsteady boundary layer on a cylinder oscillating transversely in a viscous fluid // J. Fluid Mech. 1984. V. 146. P. 347–367.
8. *Otto S.R.* On stability of flow around an oscillating sphere // J. Fluid Mech. 1992. V. 239. P. 47–63.
9. *Иванова А.А., Козлов В.Г.* Вращательные вибрации для управления фазовыми включениями в жидкости // Докл. 12-й Зимней школы по механике сплошных сред. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. С. 163.
10. *Челомей В.Н.* Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270. № 1. С. 62–67.

Пермь

Поступила в редакцию
28.II.2000