

УДК 532.546.7:534.1

© 2000 г. А.А. ИВАНОВА, В.Г. КОЗЛОВ, П. ЭВЕСК

ОЖИЖЕНИЕ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, ВЫЗВАННОЕ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ВИБРАЦИЯМИ

Экспериментально исследуется динамика сыпучей среды в заполненной вязкой несжимаемой жидкостью полости, совершающей вертикальные гармонические колебания. Эффект оживания песка охватывает небольшую по высоте часть песчаного слоя вблизи границы раздела сред, происходит пороговым образом и сопровождается интенсивными параметрическими колебаниями границы раздела. Переход песка из квазитвердого состояния в оживленное при повышении и обратный переход при понижении интенсивности вибраций в случае вязких жидкостей происходят с гистерезисом. Найдены безразмерные комплексы, определяющие динамику песка; в анализе основное внимание уделяется случаю низких безразмерных частот.

Первым систематическим исследованием поведения сыпучих мелкодисперсных сред на вибрирующей поверхности можно считать работу Фарадея [1]: эксперименты проводились с тонкими слоями, преимущественно в газах. Фарадеем обнаружены такие явления, как транспорт сыпучей среды, связанный с возбуждением колеблющейся поверхностью осредненных потоков окружающей среды, и объединение частиц в правильные геометрические структуры в виде полусферических холмиков. Результатом исследований стало детальное описание явлений и достаточно полное объяснение механизма образования холмов в относительно тонком слое сыпучей среды.

Интерес к задаче вновь возник, спустя более 100 лет после работы Фарадея, в связи с практическими приложениями [2]. В работах повторяются, изучаются и дискутируются уже обнаруженные Фарадеем явления (см. обзор [3]). Исследования проводятся, как правило, в тонком слое сухой сыпучей среды на горизонтальной твердой поверхности, совершающей вертикальные гармонические колебания. Для описания поведения песка в качестве определяющего параметра используется вибрационное ускорение $\Gamma = b\Omega^2/g$ (b – амплитуда, Ω – циклическая частота вибраций, g – ускорение свободного падения), по достижении которым значения, большего единицы, горизонтальная поверхность теряет устойчивость.

Еще Фарадей отмечал важную роль окружающей среды в поведении сыпучих сред при вибрациях, однако в большинстве современных работ изучается поведение сыпучих сред в газах. Так, в [4] отмечается сильная зависимость эффекта вибротранспорта от давления газа в области его малых значений. В [5–9] внимание уделяется взаимодействию сыпучей среды и дна полости (в подавляющем большинстве случаев толщина слоя песка составляет единицы либо десятки диаметров частиц). В зависимости от параметров вибраций в тонких слоях наблюдаются различные состояния, в том числе интенсивные параметрические колебания [5, 6]. С целью исключения влияния окружающей среды некоторые опыты проводятся в вакуумированных полостях. В этом случае динамика частиц определяется через соударение, что приводит к колебаниям частиц, в том числе в виде стоячих волн. Не останавливаясь на описании этого явления, укажем работы [7–9], в которых имеются основные ссылки.

1. Динамика жидкостно-песчаных смесей. При изучении динамики водопесчаной смеси в полости, совершающей горизонтальные вибрации, в [10] был обнаружен

новый эффект – возбуждение квазистационарного пространственного рельефа на границе раздела оживенный песок – жидкость. Там же впервые для таких систем введен безразмерный параметр $W = b^2\Omega^2/gL$, определяющий осредненную динамику границы раздела фаз при достаточно высокой частоте вибраций (b и Ω – амплитуда и циклическая частота, L – характерный размер полости). Параметр W имеет смысл энергии вибрационного воздействия на систему.

В работах [11–13] впервые задача Фарадея [1] расширена на случай толстого слоя сыпучей среды в жидкости: в заполненной песком и жидкостью полости исследуется динамика сыпучей среды при вертикальных вибрациях. Наличие в межпоровом пространстве вязкой несжимаемой жидкости приводит к тому, что песок в целом совершает твердотельное движение вместе с полостью и вибрационные эффекты проявляются лишь в области, близкой к границе раздела фаз. В такой постановке дно полости не играет определяющей роли. Обнаруженные явления принципиально отличаются от известных для относительно тонкого слоя сухой сыпучей среды.

В рассматриваемом случае при увеличении интенсивности вибраций и по достижении критического значения на плоской до того поверхности сыпучей среды пороговым образом появляются случайно разбросанные холмы полукруглой формы [11, 12]. Вблизи порога размеры холмов и скорость их формирования малы. В надкритической области в процессе установления холмы растут до размеров, при которых они начинают соприкасаться и взаимодействовать, в результате чего одни холмы поглощаются другими. Сформировавшиеся холмы достаточно регулярно распределены по поверхности; с увеличением надкритичности размеры стационарных холмов увеличиваются, время формирования рельефа уменьшается.

Несмотря на то что поверхностный рельеф остается неизменным во времени, внутри каждого холма происходит интенсивное перемещение песка. В процессе колебаний полости можно видеть "дыхание" холмов с частотой вибраций. Это значит, что на части периода песчинки приобретают подвижность и смещаются друг относительно друга. В остальной части периода благодаря взаимному сцеплению они совершают квазитвердое движение. При плавном снижении частоты и полном отклонении вибраций сформировавшийся при колебаниях рельеф сохраняется неизменным.

Движение песка в отдельно взятом холме совпадает с тем, что наблюдал Фарадей [1]. Это означает, что механизм образования холмов одинаков как в мелком слое сухого песка, так и на поверхности глубокого слоя песка, пространство между зернами которого заполнено жидкостью. Однако имеется и существенное отличие. В случае тонкого слоя сухой сыпучей среды соседние взаимодействующие холмики стремятся к объединению, в результате чего остается только один холм [1, 6, 14] либо один склон, т.е. половина холма [3]. В случае толстого слоя сыпучей среды и несжимаемой жидкости рост холмов продолжается лишь до определенного размера, а сформировавшийся рельеф со временем не меняется [11, 12].

Дальнейшее повышение интенсивности вибраций приводит к эффекту, при котором слой песка вблизи границы раздела фаз приобретает свойства жидкости, сохраняющиеся в течение всего периода колебаний. Назовем это явление оживением сыпучей среды. Непосредственно процесс перехода к оживенному состоянию занимает конечный отрезок времени, составляющий несколько десятков и даже сотен периодов. Оживение начинается либо у боковых границ полости (фронт оживения постепенно распространяется по поверхности песчаной фазы, покрытой квазистационарным рельефом), либо с вершин холмов, имеющих к этому моменту уже достаточно большие горизонтальные размеры и сравнительно пологие склоны [12].

Оживенное состояние характеризуется наличием интенсивных параметрических колебаний границы раздела песок – жидкость, аналогичных колебаниям поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей в вертикально колеблющейся полости, известных под названием "рябь Фарадея" [1, 15]. Толщина оживенного слоя, участвующего в параметрических колебаниях, относительно мала: в условиях проведенных

экспериментов даже при большой надкритичности она не превышала $100d$ (d – средний размер частиц).

При плавном снижении интенсивности вибраций песок из ожигенного переходит в квазитвердое состояние. Такой процесс назовем отвердением. При этом на границе раздела – на поверхности песчаной фазы сразу формируются холмы. Порог отвердения может совпадать с порогом ожигения, может оказаться ниже, если отвердение происходит с гистерезисом [13].

В [11–13] найдено, что вибрационная динамика сыпучей среды в жидкости при заданной относительной плотности определяется тремя безразмерными параметрами: вибрационным параметром $W_d = b^2\Omega^2/gd$, который подобен использованному в [10], но теперь определяется по размеру частиц d ; безразмерной частотой $\omega = \Omega d^2/\nu$, отвечающей за режим пульсационного течения вязкой жидкости между частицами (ν – кинематическая вязкость), и безразмерной амплитудой вибраций b/d . Показано, что по мере повышения безразмерной частоты ω критические значения W_d , соответствующие порогам возбуждения холмистой поверхности и порогам ожигения, монотонно понижаются. В области относительно больших амплитуд вибраций b/d границы переходов характеризуются постоянным значением комплекса ωW_d . Функцией ωW_d является и пространственный период холмистого рельефа.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование вибрационного процесса ожигения сыпучей среды в более широком диапазоне вязкости жидкости и интенсивности вибраций.

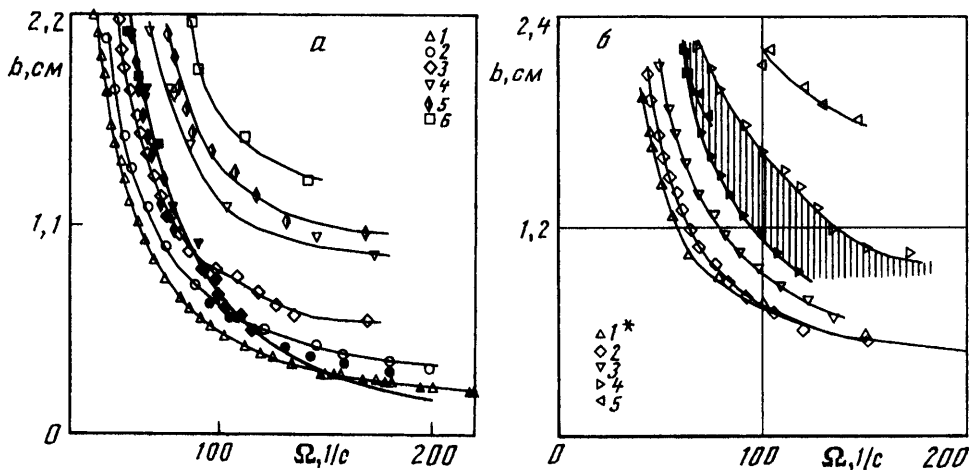
2. Методика проведения эксперимента. Для исследований использовались водоглицериновые растворы, коэффициент кинематической вязкости которых изменялся в интервале $\nu = 1\text{--}16$ сСт (измерение вязкости проводилось с помощью вискозиметра Оствальда). В качестве сыпучей среды использовались близкие по размеру стеклянные шарики диаметром $d = 0,11 \pm 0,02$ и $0,34 \pm 0,03$ мм. Плотность частиц во всех опытах оставалась постоянной и составляла $\rho_s = 2,65$ г/см³. Кювета, изготовленная из плексигласа в форме цилиндра кругового сечения диаметром $D = 34$ мм и высотой $H = 140$ мм, заполнялась сыпучей средой приблизительно до середины ($h \sim H/2$) и дополнялась жидкостью так, чтобы исключить наличие воздушной фазы. Ожигение песка происходило вблизи границы раздела сред. При этом толщина ожигенного слоя сыпучей среды не превышала 15 мм, что было значительно меньше h .

Возвратно-поступательные вертикальные колебания сообщались кювете с помощью механического вибратора (описание см. в [16]) с амплитудой $b = 0\text{--}25$ мм и частотой $f = 10\text{--}100$ Гц. Амплитуда измерялась с помощью катетометра В-630 с точностью не менее 0,1 мм, частота измерялась с помощью цифрового тахометра ТЦ-3М (точность 0,3 Гц).

Методика проведения опытов была следующей. При некоторой заданной амплитуде вибраций пошагово и плавно на каждом шаге повышалась частота и определялся порог ожигения песка; затем определялся порог отвердения при понижении частоты. В опытах варьировались вязкость жидкости, диаметр частиц и амплитуда вибраций. В ходе экспериментов обязательно контролировались вертикальность оси вибраций и отсутствие в кювете воздуха. Наблюдения проводились в стробоскопическом освещении.

Порог образования холмистого рельефа "чувствителен" к внешним возмущениям, нарушающим однородность сыпучей среды [12]. К возмущающим факторам относится, в частности, вертикальная боковая граница полости, вблизи которой развитие холмов происходит раньше, чем вдали от нее. Использование в настоящей работе кюветы сравнительно небольшого диаметра, с одной стороны, позволило расширить диапазон вибрационного воздействия в область более высоких вибрационных ускорений, с другой – привело к усилению влияния боковой границы кюветы. Порог образования холмов снизился и стал менее четким, поэтому в настоящих опытах количественно не изучался. Эффект ожигения оказался менее чувствителен к нарушениям подобного рода. Так, границы ожигения, полученные в экспериментах с водой на кюветах диаметром $D = 70$ и 34 мм, хорошо согласуются между собой [13].

3. Результаты исследований. Эксперименты показали, что с увеличением вязкости жидкости неустойчивость границы раздела сред наступает при более высоких значе-



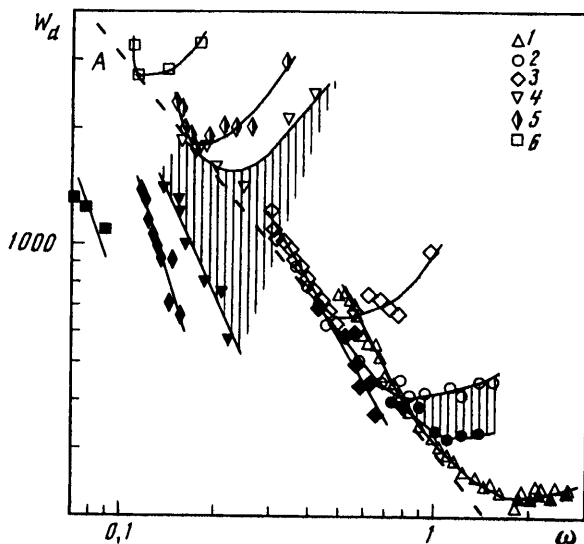
Фиг. 1. Пороговые кривые ожигения песка (светлые знаки) и отвердения (темные) на плоскости параметров Ω , b для частиц размером $d = 0,11$ (а) и $0,34$ мм (б). Обозначения 1–6 и 7–11 соответствуют вязкости жидкости ν (сСт) = 1,0; 1,6; 2,1; 5,2; 6,1 и 9,7 (а) и ν (сСт) = 1,0*; 1,9; 4,8; 9,7 и 15,7 (б). Точки 7 соответствуют опытам с кюветой диаметром $D = 70$ мм [11, 12], в остальных случаях $D = 34$ мм. Здесь и далее для жидкости одной вязкости границы переходов изображены знаками одинаковой формы: светлые отмечают границу ожигения, построенную при повышении частоты, темные – границу отвердения, полученную при ее понижении. Граница отвердения является нижней границей гистерезиса. Если гистерезис не наблюдается, границы совпадают и темные знаки отсутствуют

ниях интенсивности вибраций. Особенным для вязких жидкостей является наличие гистерезиса в переходах, в первую очередь в переходе от ожигенного состояния к квазитвердому. На фиг. 1 приведены пороговые кривые ожигения (светлые значки) и отвердения. Последние построены при понижении частоты вибраций.

Видно, что пороговые кривые ожигения, полученные для разных значений кинематической вязкости жидкости ν , однотипны. В экспериментах с водой ($\nu = 1$ сСт) гистерезис наблюдается лишь в области малых амплитуд вибраций b (темные значки 1, фиг. 1, а). При этом интервал между границами ожигения и отвердения имеет величину, сравнимую с шириной шага по частоте, т.е. сравнимую с погрешностью эксперимента. В области больших b и малых ν границы отвердения точно совпадают с соответствующими им границами ожигения как при $d = 0,11$, так и при $d = 0,34$ мм (фиг. 1, б). Для жидкостей относительно большой вязкости глубина гистерезиса возрастает с увеличением последней, что хорошо видно из сравнения пороговых кривых, соответствующих знакам 2–6 на фиг. 1, а.

На плоскости b , Ω в случае мелких частиц граница отвердения практически не зависит от вязкости – для разных жидкостей точки хорошо согласуются между собой, концентрируясь вблизи кривой 1 (фиг. 1, а).

Изменение частоты вибраций в опытах проводилось с достаточно малым шагом. Вблизи границ перехода стационарные состояния были совершенно устойчивыми и сохранялись в течение нескольких десятков минут, будь то квазитвердая поверхность вблизи порога ожигения при повышении частоты или параметрические колебания вблизи порога отвердения при ее понижении. Кроме того, порог отвердения (нижняя граница гистерезиса) мог быть определен независимо от порога ожигения, когда последний в опытах не достигался вследствие ограничения параметров установки. Для этого достаточно было перед опытом возмутить равновесие сыпучей среды и до завершения процесса оседания песка задать вибрационные параметры, соответствующие области неустойчивости. При этом устанавливались устойчивые колебания



Фиг. 2. Пороги ожигения (светлые значки) и отвердения в зависимости от безразмерной частоты $\omega = \Omega d^2/\nu$ для $d = 0,11$ мм (обозначения соответствуют фиг. 1, а); линия А отмечает границу перехода песка в ожигенное состояние

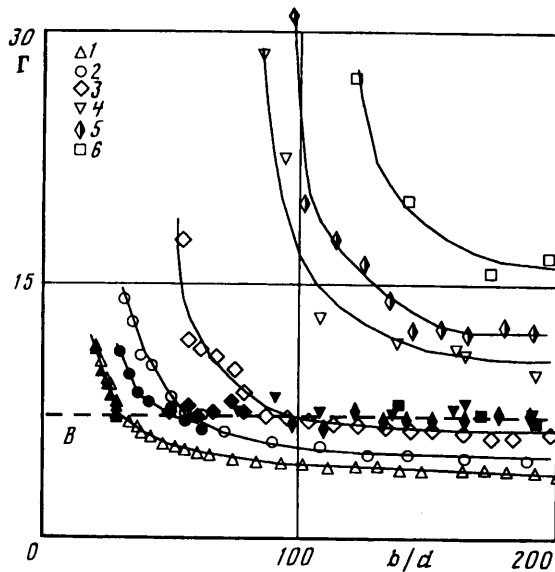
границы раздела, которые прекращались только по достижении нижней границы гистерезиса.

В случае большой вязкости для квазитвердого состояния песка вблизи границы ожигения характерным является отсутствие выраженных холмов. Визуальные наблюдения показывают, как правило, не совсем ровную поверхность (не плоскую), разрыхляющуюся и уплотняющуюся с частотой вибраций, так что создается впечатление, что поверхность "дышит". С понижением амплитуды вибраций эта особенность усиливается, интервал между порогами образования холмистого рельефа и ожигения резко возрастает.

Состояние границы раздела определяется тремя безразмерными параметрами: ω , b/d и W_d . Пороги ожигения (светлые значки) и отвердения, полученные в опытах с жидкостями вязкостью $\nu = 1-9,7$ сСт и сыпучей средой $d = 0,11$ мм, приведены на фиг. 2. На плоскости ω , W_d пороговые кривые ожигения имеют вид не совпадающих друг с другом "мешков", ниже которых сыпучая среда остается квазитвердой, выше — тонкий слой песка вблизи границы раздела сред сохраняет подвижность в течение всего периода (последнее неразрывно связано с интенсивными параметрическими колебаниями границы раздела). При этом вдоль любой пороговой кривой параметр b/d монотонно изменяется. Его значение может быть рассчитано из соотношения $W_d = (b/d)^2 \omega^2 k$, где коэффициент $k = \nu^2/gd^3$ определяется вязкостью жидкости и размером частиц и имеет постоянное значение для каждой пороговой кривой.

Пороги ожигения, соответствующие большим значениям безразмерной амплитуды вибраций b/d (левые ветви "мешков"), касаются штриховой линии А ($\omega W_d \approx 300$). Резкое отклонение пороговых кривых от А в области относительно малых b/d указывает на качественное изменение в поведении сыпучей среды.

Границы отвердения либо совпадают с соответствующими им границами ожигения (при этом темные знаки на графике отсутствуют), либо находятся ниже, и переход в квазитвердое состояние происходит с гистерезисом. В области $\nu < 2$ сСт пороговые кривые отвердения определяются значением $\omega W_d > 300$ (находятся выше линии А); в этом случае области гистерезиса невелики (фиг. 2). С увеличением вязкости порог



Фиг. 3. Зависимость вибрационного ускорения $\Gamma = b\Omega^2/g$ от амплитуды вибраций b/d в пороге (обозначения соответствуют фиг. 1, а); линия B отмечает границу отвердения ожиженного песка в случае не малых b/d

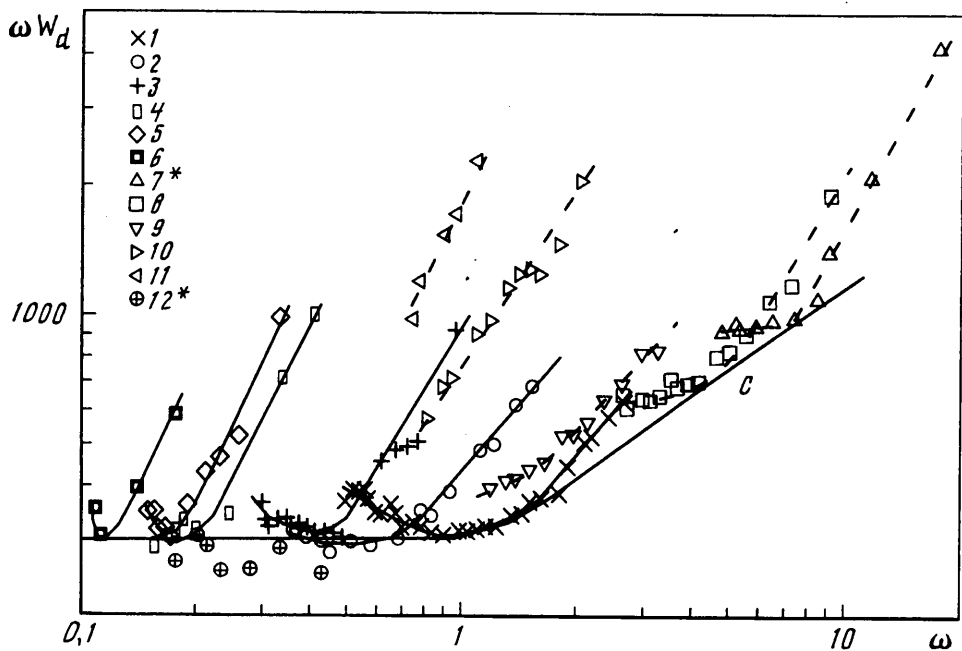
отвердения понижается, глубина гистерезиса растет (для сравнения две области гистерезиса заштрихованы).

На плоскости параметров ω , W_d границы отвердения не согласуются между собой. Это значит, что отвердение не определяется только частотой ω и параметром W_d , а зависит также от амплитуды вибраций. Проведенный в [13] анализ зависимости $W_d = f(b/d)$ показывает, что за отвердение отвечает отношение вибрационного параметра W_d к амплитуде вибраций b/d , т.е. безразмерное вибрационное ускорение $\Gamma = W_d/(b/d) = b\Omega^2/g$.

Зависимость ускорения Γ от b/d в пороге показана на фиг. 3. Точки, соответствующие границе отвердения (темные значки), независимо от вязкости группируются вблизи постоянного значения ускорения $\Gamma \approx 7$ (линия B). Пороговые кривые ожижения на данной плоскости не совпадают друг с другом: с увеличением вязкости значение Γ возрастает, однако вид кривых сохраняется. Увеличение амплитуды вибраций при постоянном значении v приводит к монотонному понижению границы ожижения. Если ожижение происходит при $\Gamma < 7$ (это наблюдается на маловязких жидкостях), границы отвердения и ожижения совпадают, гистерезис отсутствует.

Таким образом, в области не малых значений b/d переход сыпучей среды в ожиженное состояние при повышении интенсивности вибраций может быть описан безразмерным комплексом $\omega W_d = b^2\Omega^2 d/gv$: ожижение наступает по достижении этим комплексом критического значения $\omega W_d \approx 300$ (фиг. 2). Если при этом ускорение имеет значение $\Gamma > 7$, возвращение системы в исходное состояние независимо от порога возбуждения происходит при постоянном ускорении $\Gamma \approx 7$ и с гистерезисом. Сказанное не выполняется в области относительно малых b/d (фиг. 3, темные значки 1 и 2), где, как видно, границы отвердения повторяют форму пороговых кривых ожижения и находятся при $\Gamma > 7$. Это явление оставим пока без обсуждения.

В случае сыпучей среды с диаметром зерен $d = 0,34$ мм динамика границы раздела аналогична приведенной выше. По мере увеличения вязкости пороги ожижения также повышаются, однако гистерезис наблюдается в более вязкой жидкости, $v \sim 9$ сСт.



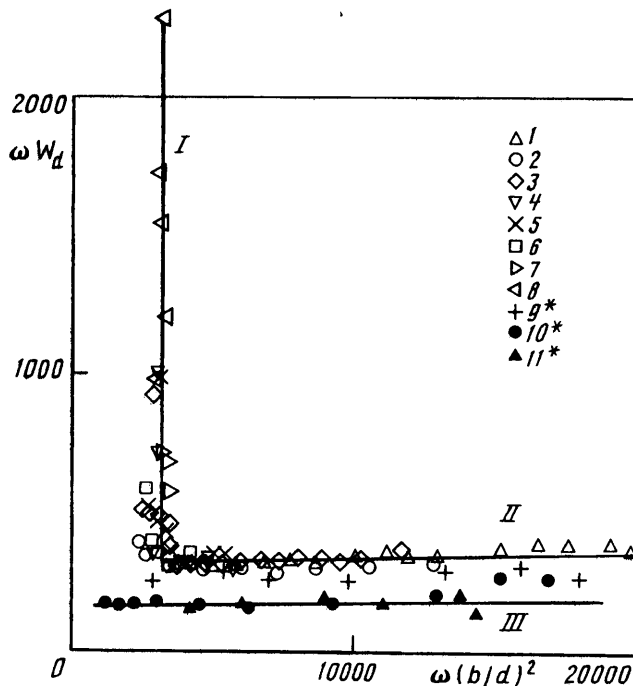
Фиг. 4. Пороги ожигения ωW_d в зависимости от частоты ω для стеклянных сферических частиц диаметром $d = 0,11$ (знаки 1–6) и $0,34$ мм (7–11) и стеклянной крошки средним размером $d = 0,06 \pm 0,02$ мм (12, [11]); точки 7 и 12 соответствуют опытам с $D = 70$ мм (в остальных случаях $D = 34$ мм)

В любом случае переход сыпучей среды в ожигенное состояние характеризуется качественным изменением ее осредненных физических свойств: частицы сохраняют подвижность в течение всего периода, взаимное сцепление и сухое трение частиц не проявляются. После прекращения вибраций ожигенное состояние сохраняется в течение отрезка времени, превосходящего период вибраций на несколько порядков, так что при повторном вибрационном воздействии после кратковременной остановки происходит возбуждение параметрических колебаний даже в допороговой области.

4. Анализ результатов. Учитывая, что в некотором интервале параметров эффект ожигения определяется произведением ωW_d (фиг. 2), представим границы ожигения в виде зависимости этого комплекса от безразмерной частоты ω (фиг. 4). Видно, что полученные в экспериментах с частицами различного размера и в жидкостях разной вязкости границы ожигения образуют семейство подобных кривых. Понижение вязкости и увеличение размера частиц приводит к смещению кривых в сторону более высоких значений частоты. При частоте $\omega < 1$ минимумы кривых находятся при постоянном значении комплекса $\omega W_d \approx 300$. То, что огибающая C имеет горизонтальный участок, позволяет предположить наличие автомодельности описанного явления по частоте в области частот $\omega < 1$.

Пороговые точки ожигения, полученные в опытах со стеклянной крошкой, находятся ниже кривой C (фиг. 4, значки 12). Это может быть связано с формой частиц, далекой от сферической: $d = 0,06$ мм означает не диаметр, а средний размер частиц произвольной формы. Тем не менее согласие можно считать вполне удовлетворительным. Следует отметить, что в экспериментах со стеклянной пудрой $d = 0,06$ мм гистерезис наблюдался уже в опытах с водой, однако детальное исследование этого не проводилось.

Однотипный характер пороговых кривых в области малых безразмерных частот свидетельствует о подобии вибрационных процессов и позволяет согласовать резуль-



Фиг. 5. Пороги ожигения для частот $\omega < 1$: $d = 0,11$ (1–6), 0,34 (7, 8) и 0,06 мм (9). Линии I и II отмечают границу ожигения, линия III – порог образования холмов на поверхности песка в случае $d = 0,11$ (10) и 0,06 мм (11)

таты различных опытов на плоскости двух комплексов $\omega(b/d)^2$ и ωW_d , являющихся комбинацией безразмерных параметров: W_d , b/d и ω . Построенные на данной плоскости пороговые кривые ожигения имеют две ветви, близкие к горизонтальной и вертикальной. При этом наблюдается расслоение кривых, которое связано с зависимостью вибрационных эффектов от безразмерной частоты ω . В то же время хорошо согласуются между собой пороговые точки из области низких частот $\omega < 1$. Это видно из фиг. 5, где на плоскости указанных параметров приведены границы ожигения для $\omega < 1$.

На плоскости комплексов $\omega(b/d)^2$ и ωW_d порог ожигения описывается достаточно простой зависимостью. Левое крыло пороговой кривой имеет вид вертикальной прямой I. Минимальное значение вибрационного параметра ωW_d составляет ~ 300 , и в области $\omega(b/d)^2 > 3000$ точки группируются вблизи кривой II, близкой к горизонтальной.

На этой плоскости пороговые точки, полученные со сферическими частицами $d = 0,11$ и 0,34 мм, хорошо согласуются как между собой, так и с результатами, полученными со стеклянной крошкой (значки 9). Более того, в случае $\omega < 1$ тем же законам подчиняется граница образования холмов (кривая III, фиг. 5).

При обсуждении результатов не анализируется зависимость эффекта от одного из важных безразмерных параметров – относительной плотности частиц $\rho = \rho_s/\rho_L$, которая в рассматриваемой задаче считается постоянной. Такое допущение оправдано тем, что эксперименты проводились со стеклянными частицами одной плотности $\rho_s = 2,65$ г/см³, а плотность жидкости ρ_L изменялась сравнительно слабо: от 1 (вода) до 1,24 г/см³ (глицерин).

Обсудим полученные результаты. Используемый для описания вибрационных явлений параметр $W_d = b^2 \Omega^2 / gd$ характеризует энергию вибрационного воздействия на сыпучую среду и по сути является вибрационным аналогом параметра Фруда.

Поясним физический смысл частоты вибраций $\omega = \Omega d^2 / \nu$. При периодическом колебании тела в жидкости с циклической частотой Ω около последнего образуется вязкий пограничный слой толщиной $\delta = \sqrt{2\nu / \Omega}$. Тогда $\omega = 2(d/\delta)^2$ характеризует отношение размера тела к толщине скин-слоя и вместе с тем характер вязкого взаимодействия колеблющегося тела и жидкости. В рассматриваемом случае ω определяет характер пульсационного течения вязкой жидкости в пористой среде, размер пор которой зависит от диаметра частиц. Предел $\omega \gg 1$ соответствует невязкому течению. В случае $\omega \ll 1$ имеет место предельно вязкий режим пульсирующего течения в пористой среде.

Безразмерная амплитуда вибраций b/d совместно с параметром ω определяет амплитуду смещения частиц относительно жидкости.

Расчеты с использованием закона Дарси показывают, что в условиях проведенного эксперимента в случае $\omega < 1$ смещение песка как целого относительно полости практически отсутствует. В то же время частицы, находящиеся на границе раздела, способны совершать в жидкости колебания. Проведенные по [2] оценки показывают, что амплитуда колебаний отдельных частиц сравнима с их размером (в условиях настоящего эксперимента). Очевидно, такие колебания могут совершать лишь частицы, находящиеся в тонком слое вблизи границы раздела. На самом деле колебания совершает относительно тонкий поверхностный слой сыпучей среды, при этом видно, как поверхность границы раздела песок – жидкость "дышит" с частотой вибраций.

При критической интенсивности вибраций возбуждается колебательная мода неустойчивости, которая приводит к интенсивным параметрическим колебаниям границы раздела. Последнее вызывает разрыхление верхнего слоя сыпучей среды в среднем и его переход в оживленное состояние. В надкритической области амплитуда параметрических колебаний в десятки раз превосходит размер частиц. В зависимости от параметров вибраций возможен как мягкий, так и жесткий режим возбуждения неустойчивости. Во втором случае наблюдается гистерезис в возбуждении и угасании колебаний.

Параметрические колебания сыпучей среды, вызванные вертикальными вибрациями полости, в настоящее время изучаются экспериментально и теоретически, однако в известных работах рассматриваются, во-первых, тонкий слой сыпучей среды, во-вторых, слой песка в отсутствие окружающей среды (вакуум), когда взаимодействие частиц определяется лишь их соударением [7, 9]. Характер взаимодействия частиц в жидкости в первую очередь определяется силами вязкого трения, особенно в области низких безразмерных частот. Рассмотренный в настоящей работе эффект, очевидно, имеет мало общего с [7, 9]. Исключение составляет работа [6], в которой при изучении тонкого слоя сыпучей среды в газах наблюдались параметрические колебания. Однако в случае жидкости и в случае газа количественное сравнение результатов затруднено в силу большого различия относительной плотности сред $\rho = \rho_s / \rho_L$.

Обнаруженные в настоящей работе эффекты нуждаются в дальнейшем экспериментальном и теоретическом изучении.

Заключение. При вертикальных колебаниях полости с песком и жидкостью исследованы пороги возбуждения параметрических колебаний границы раздела, вызывающих разрыхление и оживление верхнего слоя сыпучей среды. Определены безразмерные параметры, описывающие динамику сыпучей среды: амплитуда b/d и частота вибраций $\omega = \Omega d^2 / \nu$, вибрационный параметр $W_d = (b\Omega)^2 / gd$.

Найдено, что в предельном случае вязкого взаимодействия сыпучей среды и жидкости ($\omega < 1$) порог возбуждения параметрических колебаний песка определяется двумя безразмерными комплексами: ωW_d и $\omega (b/d)^2$. Параметр ωW_d является произ-

ведением трех простых безразмерных величин: частоты, амплитуды и ускорения. Параметр $\omega(b/d)^2 = \Omega b^2/\nu$ можно назвать пульсационным числом Рейнольдса, которое, как известно, играет важную роль в динамике колеблющегося тела.

Обнаружено, что в случае вязких жидкостей и мелких частиц границы ожигения и отвердения не совпадают и смена состояний происходит с гистерезисом. При понижении безразмерной частоты вибраций гистерезисные явления усиливаются. Граница отвердения в условиях проведенного эксперимента характеризуется критическим значением комплекса $W_d(b/d) = \Gamma$ и в случае относительно больших амплитуд b/d определяется постоянным его значением $\Gamma \approx 7$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Faraday M.* On a peculiar class of Acoustical Figures; and on certain Forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic Surfaces // *Phyl. Trans. Roy Soc. London.* 1831. V. 52. P. 299–340.
2. *Блехман И.И.* Что может вибрация?: О "вибрационной механике" и вибрационной технике. М.: Наука, 1988. 208 с.
3. *Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P.* Granular solids, liquids, and gases // *Rev. Modern Phys.* 1996. V. 68. № 4. P. 1259–1273.
4. *Pak N.K., Doorn E., van, Behringer R.P.* Effects of ambient gases on granular materials under vertical vibration // *Phys. Rev. Letters.* 1995. V. 74. № 23. P. 4643–4646.
5. *Thomas B., Mason M.O., Liu Y.A., Squires A.M.* Identifying states in shallow vibrated beds // *Powder Techn.* 1989. V. 57. № 4. P. 267–280.
6. *Douady S., Fauve S., Laroche C.* Subharmonic instabilities and defects in a granular layer under vertical vibrations // *Europhys. Letters.* 1989. V. 8. № 7. P. 621–627.
7. *Melo F., Umbanhowar P., Swinney H.L.* Transition to parametric wave patterns in a vertically oscillated granular layer // *Phys. Rev. Letters.* 1994. V. 72. № 1. P. 172–175.
8. *Swinney H.L., Umbanhowar P.B.* Stripes, squares, hexagons, and localized structures in vertically vibrated granular layers / *Proc. 3rd Intern. Conf. on Micromech. Powders and Grains, Durham, 1997 / Ed. R.P. Behringer, J.T. Jenkins. Rotterdam: Balkema, 1997. P. 369–372.*
9. *Luding S.* Surface waves and pattern formation in vibrated granular beds // *Proc. 3rd Intern. Conf. on Micromech. Powders and Grains, Durham, 1997 / Ed. R.P. Behringer, J.T. Jenkins. Rotterdam: Balkema, 1997. P. 373–376.*
10. *Kozlov V.G.* Experimental investigation of vibrational convection in pseudoliquid layer // *Hydro-mechanics and Heat / Mass Transfer in Microgravity: Reviewed Proc. 1st Intern. Symp. on Hydro-mech. and Heat / Mass Transfer in Microgravity. Perm; Moscow, Russia, 1991. Amsterdam: Gordon and Breach, 1992. P. 57–61.*
11. *Kozlov V.G., Ivanova A.A., Evesque P.* Granular material dynamics in modulated force field: Experiments // *Proc. Joint 10th Europ. and 6th Russian Symp. on Phys. Sci. in Microgravity, St.-Petersburg, Russia, 1997. Moscow: Inst. Probl. Mech. RAS, 1997. P. 237–244.*
12. *Kozlov V.G., Ivanova A.A., Evesque P.* Sand behavior in a cavity with incompressible liquid under vertical vibrations // *Europhys. Lett.* 1998. V. 42. № 4. P. 413–418.
13. *Иванова А.А.* Неустойчивость границы раздела песок – жидкость при вертикальных вибрациях // *Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь: Перм. ун-т, 2000. Вып. 2. С. 18–31.*
14. *Doorn E., van, Behringer R.P.* Wavy instability in shaken sand // *Proc. 3rd Intern. Conf. on Micromech. Powders and Grains, Durham 1997 / Ed. R.P. Behringer, J.T. Jenkins, Rotterdam: Balkema, 1997. P. 397–400.*
15. *Miles J., Henderson D.* Parametrically forced surface waves // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1990. V. 22. P. 143–165.
16. *Иванова А.А., Козлов В.Г.* Вибрационно-гравитационная конвекция в горизонтальном цилиндрическом слое // *Конвективные течения / Под ред. Е.М. Жуховицкого. Пермь: Изд-е Перм. пед. ин-та, 1985. С. 45–57.*

Пермь
Париж

Поступила в редакцию
22.IV. 1999