

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ВИБРАЦИОННЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ОБЪЕМНО-ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КЛАСТЕРОВ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ: НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

© 2021 г. Ю. Н. Маков<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
ГСП-1, Ленинские горы 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
ГСП-1, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: yuri\_makov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Экспериментально определены условия формирования характерных объемно-локализованных кластеров (в виде конусообразной насыпной горки и квазиплоской структуры в виде “лужи”), образованных сыпучими/гранулированными средами. Эти кластеры устойчивы к динамическим (вибрационным) воздействиям в определенных интервалах динамических параметров, что относит их к примерам проявления “твердотельных” свойств гранулированных сред. Эта аналогия с твердотельным агрегатным состоянием усиливается демонстрацией возможности виброперемещения указанных типов кластеров из сыпучих/гранулированных материалов с сохранением пространственной формы и объема, хотя выявленные механизмы перемещения различны для каждого из двух рассмотренных типов кластеров.

*Ключевые слова:* сыпучие/гранулированные среды, объемно-локализованные кластеры, конусообразная горка, квазиплоский кластер в виде песчаной “лужи”, вибрационное перемещение

DOI: 10.31857/S0320791921020039

Каждый раз при обращении к проблемам, связанным с гранулированными (сыпучими) средами, невольно фиксируется следующая особенность восприятия этого объекта: в массовом сознании он представляется “заурядным, непримечательным” из-за повсеместной распространенности гранулированных сред в качестве природообразующих материалов и из-за привычного и широкого их использования во все времена для строительных нужд. В противовес этому, в науке такие среды являются объектами пристального внимания и интенсивного изучения с непрекращающимся выявлением новых проблем и новых эффектов. Следует также отметить появление “рукотворных” гранулированных сред (объектов) для использования в различных прикладных целях (достаточно вспомнить огромную индустрию по производству лекарств в виде таблеток и капсул).

Всю историю регулярных научных исследований гранулированных сред условно можно разделить на два последовательных этапа: до 1980-х годов в основе почти всех исследовательских работ относительно этих объектов лежали практические применения и запросы прикладного характера (см., например, [1, 2]). Даже сформировавшаяся к тому времени новая научная область под

названием “Вибрационная механика” в части оперирования с сыпучими средами рассматривала в основном задачи прикладного характера (анализ действия вибротранспортеров, устройств и процессов вибробункеризации, виброразмелчения и виброобработки мелких объектов-гранул и др.) [3]. Начиная с указанной выше временной границы гранулированные среды (прежде всего, их динамика) становятся объектом многочисленных фундаментальных исследований в физике, акустике, механике, математике и др. Эту разницу в переходе от прикладных задач к фундаментальным проблемам можно “ощутить” хотя бы по одному из многочисленных фактов: например, в этом “новом” временном периоде большое количество исследований и публикаций посвящено изучению пространственных структур (паттернов) и их сменяемости на поверхности и в толще исследуемого объема гранулированной среды при различных динамических условиях, в т.ч. при вибровоздействиях [4–6], что явно не является прямым “выходом в практику”, а скорее соотносится с теорией самоорганизующихся структур. В заключение вводной части отметим, что обозначенный выше временной рубеж “приобщения” проблематики гранулированных сред к фун-

даментальной науке также отмечен тем, что авторитетнейший физический журнал “Physical Review, ser. E” в явном виде обозначил и зафиксировал эту область науки в качестве постоянного специализированного тематического раздела своего содержания.

Предмет исследования и основная цель данной работы определялись одной из отличительных и наглядно демонстрируемых особенностей гранулированных/сыпучих сред: присущей им способностью проявлять свойства различных агрегатных состояний в разных условиях (процессах) и при разных способах и величинах подводимой энергии [7]. Наше внимание было обращено на аналогию с твердотельным агрегатным состоянием. Эта аналогия традиционно определяется тем, что насыпаемая в некоторую емкость (или даже на некоторую плоскость без боковых стенок) гранулированная/сыпучая среда “не растекается” по всей площади дна емкости (или по всей плоскости), а формирует ограниченную по площади основания характерную объемно-локализovanную известную структуру (кластер) – конусообразную горку (холм), которая является традиционным объектом экспериментальных и теоретических исследований [8, 9]. В данной работе рассматриваются две новые дополнительные проблемы, естественным образом расширяющие и дополняющие представление о твердоподобном состоянии определенных структур, образованных гранулированными/сыпучими средами: а) определение возможности и условий формирования других (отличных от конусообразной горки) квазитвердотельных объемных гранулированных (сыпучих) структур, б) исследование очевидного и остающегося без должного внимания необходимого свойства “твердотельности” гранулированных структур – их способности к перемещению “как целого” по основанию при создании соответствующих условий, например, при отклонении от горизонтали вибрирующей плоскости, на которой расположена рассматриваемая структура (такое же поведение характерно и для реального твердотельного образца). Сюда же добавляется нетривиальный вопрос о механизмах виброперемещения различных квазитвердотельных структур. В связи с поставленными задачами следует подчеркнуть, что в большинстве исследований по гранулированным средам других авторов задачи, аналогичные нашим, не могли быть поставлены в силу объективных причин, а, именно, эти исследования имели дело с “неизолированными” по площади структурами в виде простейшего слоя гранулированного материала, занимающего всю площадь дна экспериментального сосуда. Для наглядности на рис. 1а показан часто используемый для исследования по вибровоздействию объект в виде слоя гранулированного материала, а на рис. 1б – объект наших исследований (в т.ч., по виброперемещению), являющийся плоским, изолированным от боковых стенок пес-

чаным кластером, проведение экспериментов с которым мы не встречали ни разу.

В нашей работе существенную роль играют вибровоздействия на гранулированные структуры, что соединяет теорию собственно гранулированных сред с теорией вибрации и вибровоздействия на различные среды [10, 11].

Переходя к описанию исследований, представим составные элементы проведенных экспериментов (с некоторыми новыми подходами в методике их проведения). В качестве основного объекта исследований использовался просеянный сухой строительный песок с характерным линейным размером частиц, не превышающим 0.25 мм, причем 90% песчинок имели размер, лежащий в пределах 0.1–0.2 мм. Все эксперименты проводились с небольшими порциями песка, помещенными на квадратную плексигласовую площадку со стороной 150 мм, которая являлась дном плексигласового сосуда (емкости) в виде параллелепипеда. Заметим, что наличие емкости, а конкретнее, ее боковых стенок, не являясь принципиально необходимым условием для данных экспериментов, создает лишь дополнительное удобство, препятствуя бесконтрольному “распылению” песка при вибровоздействиях. Указанная плексигласовая емкость жестко присоединялась к подвижному вибростолу марки ПВКУ-1 (переносное виброкалибровочное устройство). Ускорения и смещения вибростола с данной емкостью (нормальные к его поверхности) фиксировались закрепленным на вибростоле виброметром типа 2511 фирмы “Брюль и Кьер”.

Разработанный нами и впервые представленный в публикации [12] новый методический подход к проведению исследований заключался в том, что малогабаритность вибростенда и его небольшой вес, не превышавший 3.5 кг, позволяли проводить эксперименты при контролируемом удержании всей конструкции в руках, осуществляя требуемые изменения наклона плоскости стола с находящейся на нем порцией песка, что, в свою очередь, позволяло с высокой чувствительностью “улавливать” нужные эффекты. Все вышесказанное (конструкция установки, ее действие в “ручном режиме”) продемонстрировано на рис. 2.

Следует отметить, что изучение многочисленных работ по вибровоздействиям на сыпучие/гранулированные среды показало отсутствие предшественников как по сути экспериментов, так и по методике их проведения. Во всех существующих работах представлены результаты либо по перемещению гранулированной среды в виде непрерывного течения, либо по структурно-динамическим изменениям (движениям) в среде, целиком покрывающей дно используемой емкости (контейнера) со значительным влиянием на процессы боковых стенок.

Разработка и применение упомянутой выше методики с использованием вибростенда, нахо-



**Рис. 1.** (а) – Традиционная для исследований система – слой гранулированного материала в вибрирующем сосуде; (б) – **новый** объект для исследований – **плоский кластер**, объемно-локализованная, изолированная от боковых стенок гранулированная (сыпучая) структура.

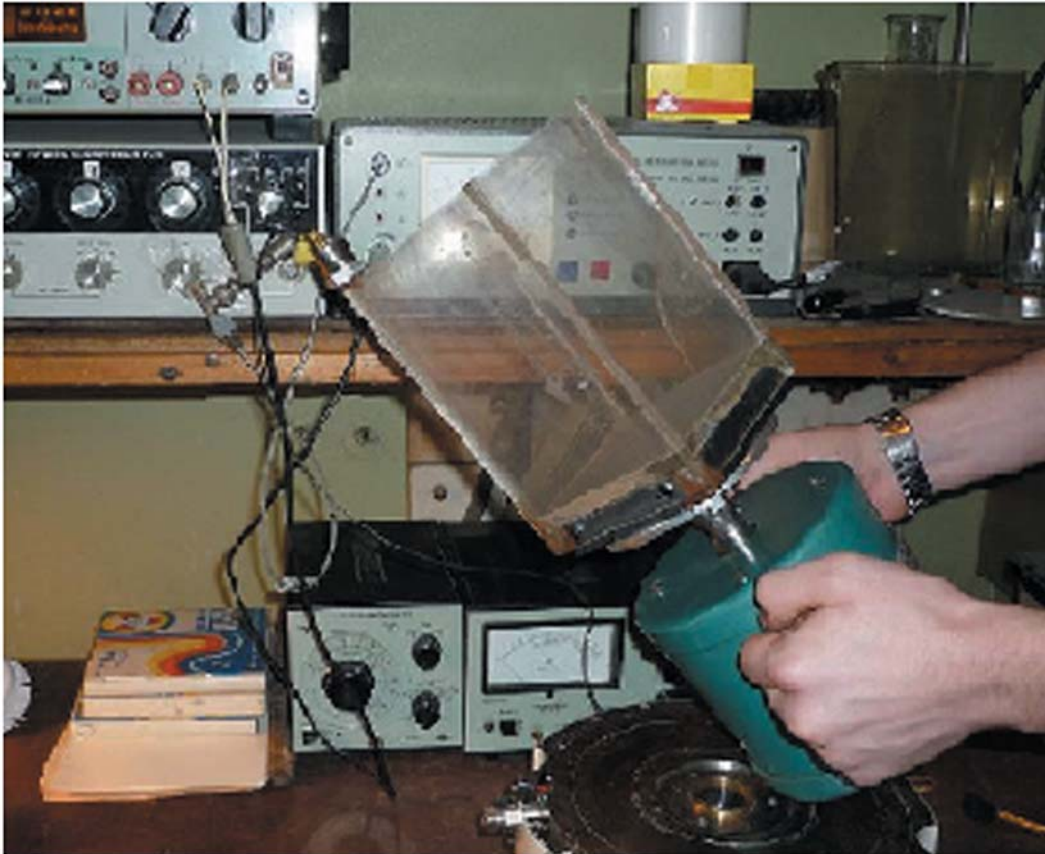
дыщегося и удерживаемого в руках (см. рис. 2) с целью оперативного изменения его ориентации во время эксперимента для “поимки” условий (режимов) проявления нужных эффектов, привело к необходимости построения и анализа модели взаимосвязанной системы “вибрирующий объект (электродинамический вибростенд) – удерживающие руки”. Руки в этой системе обеспечивали с помощью обратной связи со стороны центральной нервной системы стабилизирующую и корректирующую функции по отношению к “отдаче” и “уводу” корпуса работающего в удерживающих руках вибростенда. Поскольку эта “робототехническая часть” исследований не соотносится напрямую с излагаемым материалом, здесь приведены лишь данные (рис. 3) по частотным зависимостям ускорения и смещения подвижного стола вибростенда при его работе в двух режимах: 1) в стандартном режиме вертикально стоящего на жестком основании работающего вибростенда, 2) в режиме работы вибростенда при его удержании в руках.

Полученные и приведенные на рис. 3 зависимости давали “ориентиры” в определении подхо-

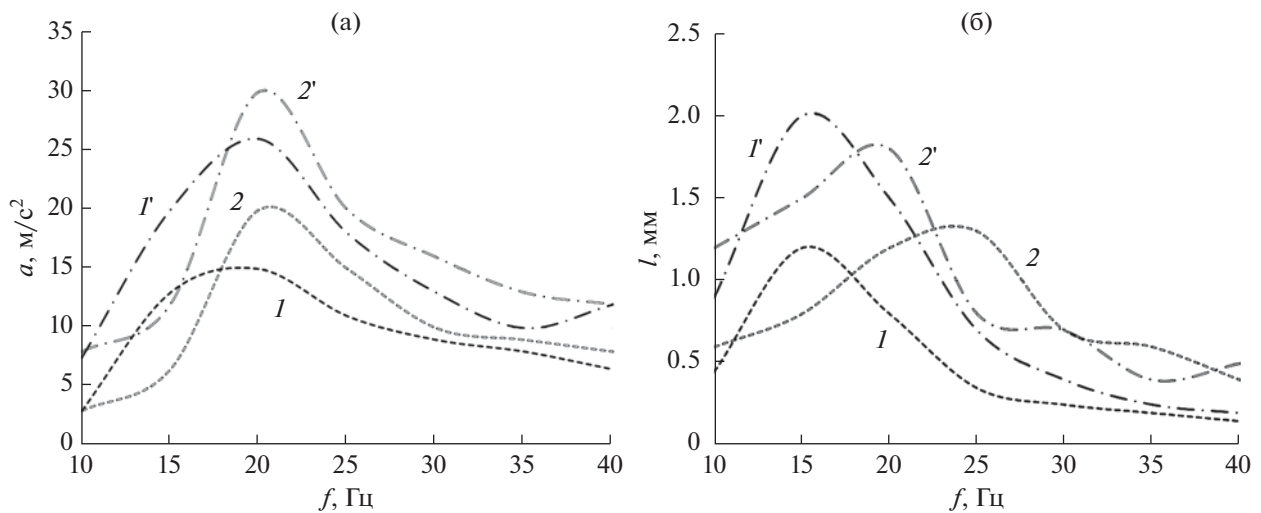
дящих значений ускорения  $a$  и смещения  $l$  (или амплитуды смещения  $A$ ) вибростолы для получения нужных эффектов вибровоздействия.

Представление результатов экспериментальных исследований начнем с найденных особенностей передвижения по наклонной плоскости квазиплоского песчаного кластера (песчаной “лужи”) – ограниченного по площади сравнительно тонкого ( $\sim 1.5\text{--}2$  мм толщиной в центральной части) слоя сухого песка (см. рис. 1б). В отличие от конической горки, кластер этого вида (несмотря на его структурную простоту) встречается значительно реже. На рис. 4 показан пример подобного кластера природного происхождения.

Для проведенных экспериментов такой кластер из песка формировался нами на дне вибрирующей и отклоняемой от вертикали емкости (см. рис. 1, 5, 6), что требовало определенных усилий, поскольку готовый кластер такого типа должен быть структурно устойчивым при вибровоздействиях (хотя бы с определенными параметрами). Напомним, что при воздействии вибрации на слой (в нашем случае, на локализованный относительно боковых стенок слой) гранулированного/сы-



**Рис. 2.** Удерживаемый в руках вибростенд с прикрепленной емкостью из плексигласа, на дне которой наблюдались виброперемещения песчаных кластеров.



**Рис. 3.** Частотные (в интервале экспериментальных частот) зависимости (а) – ускорения  $a$  и (б) – смещения  $l$  стола вибратора. Зависимости  $l$  и  $l'$  для стандартного вертикального положения вибратора на стационарном основании; зависимости  $2$  и  $2'$  для вибратора в руках. Номерами без штриха и со штрихом обозначены зависимости для двух уровней питающего вибратор напряжения.

пучего материала в общем случае проявляются два фактора, “разрушающие” исходную форму квазиплоского кластера:

1) фарадеевский механизм образования конусообразных холмов (горок) на поверхности вибрирующего слоя гранулированного/сыпучего ма-



Рис. 4. Пример гранулированного квазиплоского кластера природного происхождения.

териала [13, 14], показывающий, что любые “затравочные” неровности на поверхности слоя стимулируют процесс образования фарадеевских холмов. Это определяло процесс формирования квазиплоских кластеров, состоявший из аккуратного равномерного рассыпания песка достаточно тонким слоем на некотором ограниченном участке дна емкости с последующим выравниванием поверхности песочного “пятна” мягкой кисточкой;

2) при превышении безразмерным виброускорением  $\Gamma = A\omega^2/g$  ( $A$  – амплитуда смещения вибрирующего с ускорением  $a$  вибростола,  $\omega$  – круговая частота вибрации,  $g$  – ускорение свободного падения) единичного порогового значения начинается процесс флюидизации вибрирующего гранулированного/сыпучего кластера, что также разрушает форму кластера.

Наибольший интерес представляют перемещения квазиплоского кластера по вибрирующему основанию (дну емкости) с наименьшим влиянием указанных двух “разрушающих” этот кластер факторов. Поэтому экспериментально (с привлечением теоретических соотношений) была найдена область значений параметров  $A$  и  $f$  (см. рис. 5, затемненная область), обеспечивающих наиболее сохраняемый по форме режим виброперемещения данного кластера.

После характеристики различных особенностей, касающихся хотя и простого по форме и строению, но нового для исследования квазиплоского кластера, представим результаты по его “способностям” к передвижению как целого по наклонной плоскости. При этом интересно и полезно “провести параллель” между поведением этого кластера на стационарной и вибрирующей наклонной плоскости.

1. Квазиплоский, ограниченный по площади песчаный кластер на наклонной стационарной (без вибрации) плоскости, угол наклона которой постепенно увеличивается (см. рис. 6).

При обозначенных в этом подразделе условиях эксперимент показал, что микроструктурные характеристики дна емкости и отдельных гранул используемого сыпучего материала (сухой песок) обеспечивали достаточно сильное общее “сцепление” основания кластера и дна емкости, так что изменение наклона этой системы в достаточно широких пределах (от 0 до  $\varphi_{кр} \sim 42^\circ$ ) не влияло ни на начальное положение кластера, ни на его форму (см. рис. 6а). Однако, как только угол наклона превышал значение  $\varphi_{кр}$ , то происходило хорошо известное явление, именуемое лавиной, обвалом и т.д., когда поверхностные слои кластера съезжают с нижних слоев и образуют впереди характерные “языки” (см. рис. 6б). Следует обратить внимание, что в данной ситуации угол  $\varphi_{кр} \sim 42^\circ$ , при котором происходит обвал (лавины) части пес-

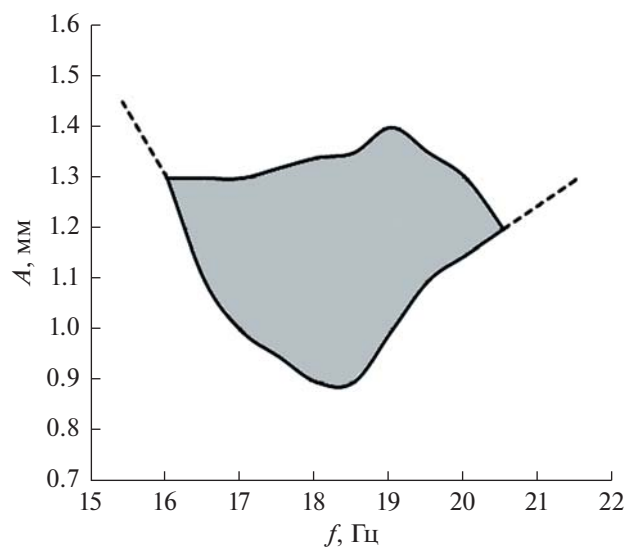
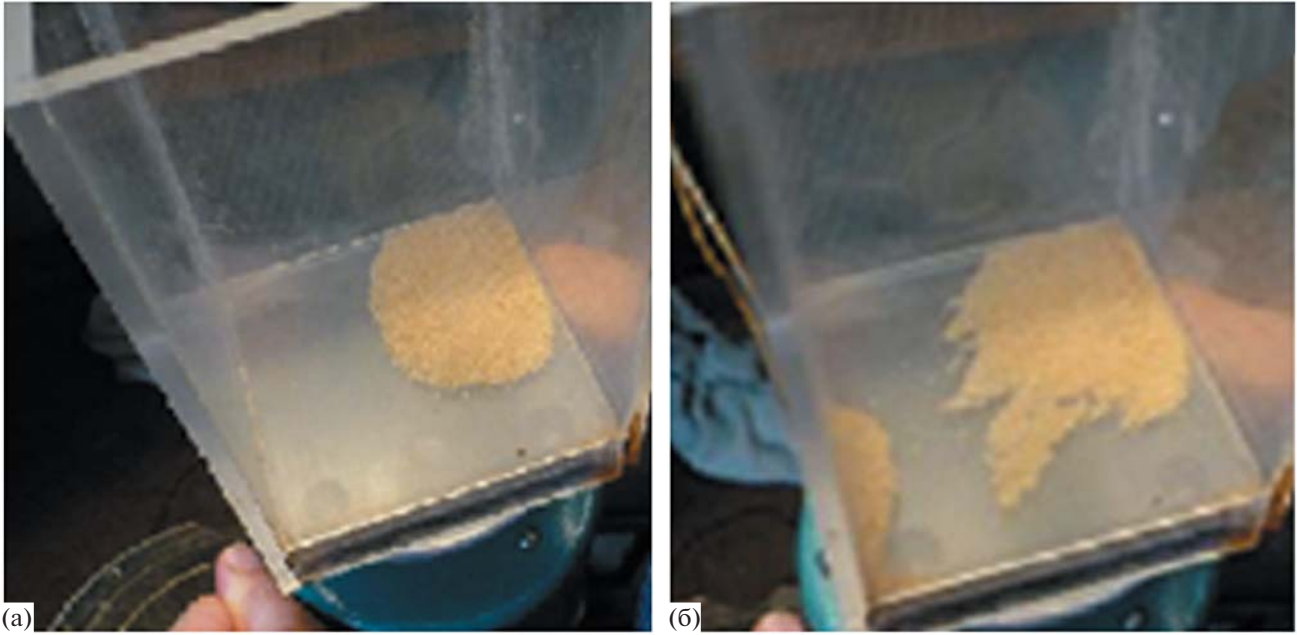


Рис. 5. Область значений параметров, обеспечивающих виброперемещение плоского кластера при сохранении его формы.



**Рис. 6.** Поведение квазиплоского кластера на наклонной плоскости без вибрации: (а) – при постепенном наклоне до критического значения угла (в данном случае  $\varphi_{кр} = 42^\circ$ ) кластер не сдвигался и не изменял своей формы, (б) – при достижении угла наклона  $\varphi_{кр}$  верхний слой кластера лавинообразно съехал с нижнего слоя, граничившего с плексигласовой плоскостью основания.

ка из состава данного кластера, заметно превосходит аналогичный параметр – угол естественного откоса (для песка, в зависимости от его состава (качества) он лежит в пределах от  $25^\circ$  до  $30^\circ$ ), при котором происходит обвал с наклонной поверхности насыпной конусообразной горки песка.

2. Квазиплоский, ограниченный по площади песчаный кластер на наклонной плоскости, подверженной вибрации (рис. 7).

В условиях данного эксперимента удалось зафиксировать не отмечавшийся ранее эффект, когда в довольно узкой области параметров вибрации в соответствии с найденной и приведенной на рис. 5 рабочей областью (по частоте вибрации от 16 до 19 Гц, по амплитуде вибрационных смещений  $A$  соответственно от 1.4 до 0.9 мм) находящийся на дне вибрирующей емкости песочный квазидвумерный кластер практически без изменения своей формы свободно перемещался (не испытывая заметного трения скольжения) по наклонному дну, “чутко” реагируя на изменения ориентации наклона (рис. 7). Наиболее отчетливо эффект “скольжения” песчаной структуры по наклонной вибрирующей подложке проявлялся при углах наклона  $\varphi$  в интервале от  $22^\circ$  до  $27^\circ$ . В этом эффекте, **определяемом вибрацией**, примечательными являются соединенные вместе два фактора:

1) хорошая консолидация структуры из отдельных неадгезированных частиц сухого песка, первоначальная форма которой практически не меняется в процессе движения этой структуры как единого целого;

2) значительно пониженное значение коэффициента трения скольжения между основанием всей песчаной структуры и вибрирующей подложкой (в данном случае, вибрирующей подложкой из плексигласа). Проявление этих двух факторов отчетливо фиксируют сопоставимые кадры, представленные на рис. 6 и 7 (для экономии места на каждом из рисунков представлены только два кадра, соответствующие практически началу и завершению процесса; в действительности для сопоставления имеется целая серия таких кадров, полученных через более короткие временные промежутки).

Для объяснения этого эффекта отметим, прежде всего, что в приводимом выше параметре, характеризующем любой процесс, связанный с вибрацией, – в безразмерном ускорении  $\Gamma = A\omega^2 \cos(\varphi)/g$  добавляется множитель в виде косинуса угла наклона  $\varphi$  вибростола из-за вибрационного перемещения подложки в направлении своей нормали, которая, в свою очередь, наклонена к направлению вертикали на угол  $\varphi$  (см. рис. 8). В научной литературе параметр  $\Gamma$  также называется интенсивностью ускорения.

Исходя из приведенных выше значений частоты и амплитудных смещений вибрации подложки, а также углов наклона, при которых наблюдался данный эффект, следует, что он реализуется при значениях интенсивности  $\Gamma$  незначительно превосходящих единицу. Известно (например, см. [15]), что активно развиваемые в последние годы исследования по влиянию вибровоздействия на степень уплотнения (“упаковки”) гранул (ча-

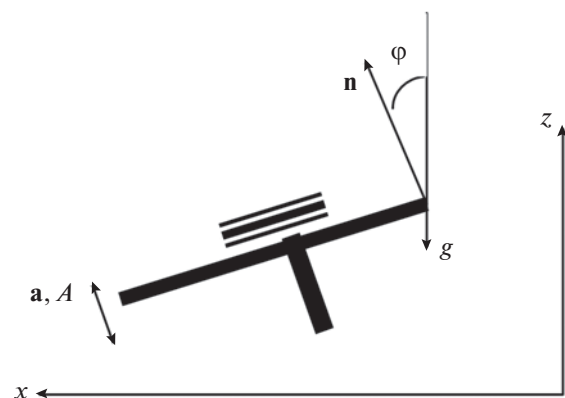


**Рис. 7.** Свободные без заметного трения передвижения квазиплоского кластера по наклонной вибрирующей плоскости из (а) – исходного положения в (б) – любое конечное положение с практически полным сохранением формы кластера. Условия на параметры вибрации и на углы наклона плоскости, при которых реализуются перемещения кластера практически без трения, обсуждаются в тексте.

стиц) в массиве гранулированной (сыпучей) среды показывают наилучший результат (достижение максимального эффекта упаковки) именно при вибровоздействии с небольшими (от единицы до двойки) значениями  $\Gamma$ . Заметим, что повышение интенсивности вибрации наоборот разуплотняет сыпучую массу, приводя ее в состояние виброфлюидизации, виброкипения и т.п. Таким образом, основой наблюдаемого эффекта является максимальное уплотнение приготовленного песчаного квазиплоского кластера с “наилучшей” упаковкой отдельных песчинок в нем при выбранных условиях вибровоздействия. Если в рамках общей теории гранулированных сред связывать статическое состояние насыпанной массы среды с твердотельным агрегатным состоянием, то можно сказать, что в нашем эксперименте выбранный режим вибровоздействия повышал степень “твердотельности” исследуемой квазиплоской структуры, что проявлялось в ее консолидации и неизменности формы при перемещениях. В основе второй отличительной особенности эффекта – уменьшении трения скольжения плоской песочной структуры при движении по наклонной вибрирующей плоскости – лежит только что отмеченная дополнительная консолидация плоской песочной структуры, которая как бы превращается за счет этого в квазитвердый монолитный диск (наподобие металлической монеты). Поскольку в целом весь эффект наблюдается при значениях  $\Gamma$ , не-

сколько превышающих единицу именно в проекции на ось  $z$ , то в некоторые краткие интервалы периода вибраций плоская консолидированная песчаная структура будет отставать от плоскости основания, падая вертикально вниз (см. рис. 8), а значит, постепенно смещаясь вдоль плоскости основания к ее “нижнему” краю, причем этот процесс перемещения за счет падения в воздухе вообще не связан с действием трения скольжения песка вдоль плоскости.

Обратимся теперь к еще одному, более “естественному” для гранулированной/сыпучей среды твердоподобному кластеру в виде конусообраз-



**Рис. 8.** Геометрия наклонно вибрирующей подложки (вибростола).

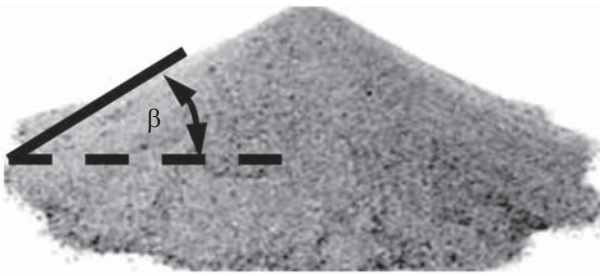


Рис. 9. Насыпная конусообразная горка песка с отмеченным углом естественного откоса  $\beta$ .

ной горки, образуемой в процессе умеренного по интенсивности насыпания материала из локализованного источника сверху (см. рис. 9). Кластер такой структуры для проведения экспериментов с виброперемещением уже был представлен в начале статьи.

Данная структура в своем статическом равновесном состоянии характеризуется углом естественного откоса  $\beta$  – углом между образующей боковой поверхности и ее проекцией на плоскость основания. При искусственном увеличении в локальном месте угла наклона боковой поверхности данной горки в этом месте произойдет локальный обвал песка и значение угла естественного откоса практически восстановится.

Для проведения наших экспериментов кластер данного типа в виде насыпной горки формировался естественным образом: из локализованного источника сверху довольно “тонкой” струей сыпался песок на дно емкости, образуя горку. Процесс останавливался, когда горка была сформирована, но ее основание по площади было заметно меньше площади всего дна емкости.

На наклонном вибрирующем дне плексигласовой емкости, прикрепленной к вибростолу, эта конусообразная горка (конусообразный кластер) перемещалась с относительной легкостью (в смыс-

ле несущественного влияния сил трения между частицами песка в основании кластера и поверхностью плексигласа) и с быстрым реагированием на смену угла наклона системы (см. рис. 10).

Вспомним, что подобный феномен “легкого” перемещения при действии вибрации наблюдался также для квазиплоского кластера и был объяснен нами микроподскоками от виброповерхности хорошо уплотненной вибрацией дископодобной песчаной структуры, аналогичной твердотельному образцу той же геометрии (например, металлической монете).

Однако, эксперименты показали, что механизм легкого виброперемещения конусообразного кластера совсем другой, нежели для квазиплоского кластера. Действительно, принимая во внимание, что распределение напряжений внутри горки сыпучей среды является собой арочную структуру (см., например, [16]), заключаем, что центральная часть основания конуса песчаной локализованной структуры – это зона низкого давления, что, в свою очередь, обеспечивает наличие там же зоны менее плотного материала. При увеличении виброускорения нижний слой кластера будет представлять собой **виброфлюидизированную** [14] среду, через которую проходит значительный воздушный поток, заметно ослабляющий силы сцепления частиц песка с плексигласом. Это нейтрализует эффект сухого трения при перемещениях кластера (заметим, что при этом может проявиться влияние вязкого трения воздушного потока под основанием). Данный механизм перемещения конусообразного кластера напоминает эффект “воздушной подушки”. Также подходящей аналогией является беспрепятственное движение (“бегание”) капли жидкости по дну (точнее, над дном) раскаленной сковороды за счет паровой прослойки между каплей и раскаленной поверхностью (эффект Лайденфроста).

Отмеченное движение воздушного потока внутри конусообразного кластера с учетом его пе-



Рис. 10. (а) – Горка песка на вибрирующем вертикально основании с флюидизированной поверхностью. (б) – Движение горки по наклонной вибрирующей поверхности. На врезке – схема циркулирующего движения отдельных частиц и воздуха (светлые стрелки).



ремещения как целого с переменным ускорением (за счет переменного ускорения виброоснования, на котором располагается и по которому передвигается кластер, см. рис. 10) является причиной интенсивного циркулярного движения гранул (песчинок) вдоль образующих боковой поверхности горки с “заходом” (вместе с воздушным потоком) во внутрь горки (см. врезку на рис. 10). Именно этот интенсивный циркуляционный процесс обеспечивает сохранение геометрической структуры конусообразной горки на вибрирующем основании (в т.ч., при его движении по наклонному вибрирующему основанию). Рассмотрим циркуляционный поток песчинок снаружи и внутри кластера при его вертикальном вибрационном движении как целого. Сопоставим это рассмотрение с синусоидальным смещением по вертикали плоскости вибростолла, обращая внимание на особенности в каждую четверть периода от начального момента движения плоскости вверх. В первой четверти горка вместе с основанием движется вверх, и обтекающие потоки воздуха заставляют частицы скатываться по боковой поверхности вниз. Во второй четверти периода из-за высокого ускорения ( $13 \text{ м/с}^2$ , при частоте 21 Гц и амплитуде вибраций 1.5 мм) горка отрывается от виброплиты и под ней создается зона пониженного давления, “засасывающая” воздух и частицы среды. В третьей четверти периода виброоснование вновь приближается к основанию горки снизу, давление растет, воздух и частицы среды, в соответствии с распределением давления [17, 18], выталкиваются вверх. В четвертой четверти, после столкновения горки с виброоснованием, частицы, находящиеся на края конуса в приповерхностном слое, где равновесие обеспечивается, в том числе, и силами сцепления, скатываются вниз, увлекаемые потоками воздуха. Это объясняет, почему частицы в вибрирующей горке совершают вихреобразные движения, двигаясь по склонам вниз и поднимаясь внутри горки. Для конического кластера на вибрирующем основании в результате такого механизма обеспечивается сохранение формы и массы кластера при интенсивной циркуляции частиц и воздуха возле краев и внутри структурного образования.

Таким образом, рассмотренные в данной работе кластеры из одного и того же гранулированного/сыпучего материала (песка), предназначенные для демонстрации общего свойства этих сред — возможности проявлять характерные признаки разных агрегатных состояний (в данном случае, признаки твердоподобного состояния), — довольно неожиданно показали различие в механизмах такого процесса как виброперемещение, что имеет самостоятельное общенаучное и прикладное значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1942.
2. *Клейн Г.К.* Строительная механика сыпучих сред. М.: Стройиздат, 1977.
3. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. М.: Наука, 1994.
4. *Aranson I.S., Tsimring L.S.* Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78. № 2. P. 641–692.
5. *Zhang F., Wang L., Liu C., Wu P., Zhan S.* Patterns of convective flow in a vertically vibrated granular bed // *Phys. Lett. A.* 2014. V. 378. P. 1303–1308.
6. *Opsomer E., Noirhomme M., Vandewalle N., Falcon E., Merminod S.* Segregation and pattern formation in dilute granular media under microgravity conditions // *NPJ Microgravity.* 2017. V. 3. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41526-016-0009-1>
7. *Jaeger H.M., Nagel S.R.* Granular solids, liquids, and gases // *Rev. Mod. Phys.* 1996. V. 68. № 4. P. 1259–1273.
8. *Herrmann H.J.* On the shape of a sandpile, in book: *Physics of dry granular media* (Ed. *Herrmann H.J.*). Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 319–338.
9. *de Ryck A., Condotta R., Dodds J.A.* Shape of a cohesive granular heap // *Powder Technology.* 2005. V. 157. № 1–3. P. 72–78.
10. *Алексеев В.Н., Громов А.Н., Громов Ю.И., Овчаренко А.Т., Рыбак С.А.* Движение тел под действием вибраций в гранулированных средах // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 3. С. 293–298.
11. *Лебедев-Степанов П.В., Руденко О.В.* Акустические течения в слое жидкости на вибрирующей подложке // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 6. С. 693–697.
12. *Маков Ю.Н., Фефелов И.А.* Новые вибродинамические эффекты с ограниченными порциями сыпучей среды при “ручном” управлении пространственной ориентацией малогабаритного вибростенда / *Труды XXV-ой сессии РАО.* М.: ГЕОС, 2012. Т. 1. С. 59–63.
13. *Faraday M.* On a peculiar class of acoustical figures; and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces // *Philos. Trans. R. Soc. London.* 1831. V. 121. P. 299–340.
14. *van Gerner H.J., van der Hoef M.A., van der Meer D., van der Weele K.* Interplay of air and sand: Faraday heaping unravelled // *Phys. Rev. ser. E.* 2007. V. 76. P. 05105(1–7).
15. *An X.Z., Yang R.Y., Zou R.P., Yu A.B.* Effect of vibration condition and inter-particle friction on the packing of uniform spheres // *Powder Technol.* 2008. V. 188. P. 102–109.
16. *Ai J., Chen J.F., Rotter J.M., Ooi J.Y.* Numerical and experimental studies of the base pressures beneath stockpiles // *Granular Matter.* 2011. V. 13. P. 133–141.
17. *van Marais G.R.* Stresses in wedges of cohesionless materials formed by free discharge at the apex // *J. Eng. Industry.* 1969. V. 91. № 2. P. 345–352.
18. *Michalowski R.L., Park N.* Admissible stress fields and arching in piles of sand // *Geotechnique.* 2004. V. 54. № 8. P. 529–538.