



**Радовский Б.С.,**  
д.т.н., проф.  
(Internet Laboratories, Inc., США)

# СЕГРЕГАЦИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НЕЙ В США

Сегрегацией асфальтобетонной смеси принято называть неравномерное распределение крупных и мелких зерен и битума в объеме асфальтобетона. В результате необходимые пропорции каменного материала, битума и воздуха нарушаются, что приводит к значительному (10–50%) сокращению срока службы покрытия. В первой части статьи мы рассмотрим сегрегацию как физическое явление. Поскольку теория этого процесса пока не создана, основное внимание будет уделено экспериментальным данным о сегрегации зернистых материалов при различных внешних воздействиях. Во второй части статьи будет рассмотрена сегрегация асфальтобетонной смеси.

## 1. ЯВЛЕНИЕ СЕГРЕГАЦИИ

Сегрегацией можно назвать процессы, оказывающие на смесь зернистых материалов (сухую или с жидкостью) действие, противоположное перемешиванию. Перемешивание преследует своей целью обеспечить однородность состава смеси в пределах всего объема материала, а сегрегация, напротив, приводит к неоднородности смеси. Сегрегации подвержены как сухие смеси зерен различного размера и (или) массы, так и смеси зерен с жидкостями.

### 1.1. Особенности зернистых материалов

До недавних пор даже простейшие проявления сегрегации не находили научного объяснения. Вместе с тем, зернистые материалы широко используются при производстве строительных материалов и изделий, абразивов, керамики, твердого ракетного топлива, при добыче и переработке полезных ископаемых, в пищевой, химической, фармацевтической и косметической отраслях промышленности, порошковой металлургии, в сельском хозяйстве и в других областях. По некоторым оценкам, на различные технологии с применением зернистых материалов ежегодно приходится свыше 10% всех энергетических затрат.

Производство и переработка зернистых материалов связаны с выполнением разнообразных технологических процессов: измельчение, смешивание, гранулирование, транспортировка, сортировка, сушка, уплотнение, обжиг и др. Для рациональной организации этих процессов, прежде всего, необходимо понимать закономерности поведения зернистых материалов. К сожалению, эти закономерности пока изучены недостаточно. Например, замечено, что при перемешивании зернистых материалов в барабанном смесителе имеется оптимальное число оборотов, при котором получается самая однородная смесь [1]. С увеличением числа оборотов сверх этого оптимума смесь ухудшается вследствие сегрегации. Однако пока не известно, как зависит оптимальное число оборотов от зернового состава смеси, размеров, массы, формы и шероховатости зерен, диаметра барабана, процента заполнения его объема и скорости вращения.

Зернистые материалы, вообще, изучены гораздо хуже, чем газы, жидкости и твердые тела. С одной стороны, зернистый материал

### От редакции

Уже многие десятилетия асфальт остается самым распространенным типом дорожного покрытия. По мере увеличения объемов производства и укладки асфальтобетонной смеси все большую актуальность приобретает проблема ее сегрегации. Дополнительную остроту придает ей отсутствие цельной, до конца проработанной теоретической базы. В предлагаемой вниманию читателей статье доктора технических наук, профессора Радовского Б. С. (Internet Laboratories, Inc., США) дан подробный анализ современных научных представлений о теории сегрегации сыпучих материалов и рассмотрены практические меры, призванные свести к минимуму вредные последствия сегрегации для качества как самой асфальтобетонной смеси, так и создаваемых с ее помощью дорожных покрытий.

Учитывая значительный объем статьи, редакция сочла возможным изменить традиционный шаблон верстки и разделить ее на две части — «теоретическую» (страницы голубого цвета) и «практическую» (страницы зеленого цвета). Кто-то сначала ознакомится с теорией и уже «вооруженный» ею приступит к рассмотрению прикладных вопросов. Кому-то, наоборот, удобнее начать с практики. Уверены в одном — и те, и другие не только с интересом прочитают написанный образным, живым языком материал (что не так уж часто встречается в специальных изданиях), но и извлекут из него немало полезного для своей практической работы.

занимает промежуточное положение между твердым телом и жидкостью, поскольку он состоит из твердых частиц и способен к течению. Однако зернистый материал обладает комплексом свойств, присущих только ему. Например, при переливании жидкости из цилиндрического сосуда в кубический ее объем остается прежним. Объем же зернистого материала изменяется с изменением формы. Если до деформации он был уплотнен, то после деформации объем, занимаемый зернистым материалом, увеличится (из-за разрыхления при сдвиге). И напротив, первоначально рыхлый зернистый материал в результате сдвиговой деформации становится более плотным.

Даже в состоянии покоя зернистый материал ведет себя самым странным образом. Кажется очевидным, что под 30-метровой кучей песка вертикальное давление гораздо больше, чем под 3-метровой. Однако это не так. Давление жидкости на дно сосуда неограниченно возрастает пропорционально высоте ее уровня. Давление же сыпучего вещества на основание сначала растет, а потом его рост настолько замедляется, что далее оно остается практически неизменным. Если песок высыпать на стол, он образует конусообразную кучу. Эксперименты показали, что давление, которое она оказывает на поверхность стола, максимально не в центре, под пиком, а ближе к краям, что, возможно, объясняется т.н. арочным эффектом.

Другим примером является течение. Когда жидкость вытекает из цилиндрического сосуда через отверстие в его дне, ее расход пропорционален высоте столба жидкости (напору) и площади отверстия. При истечении же зернистого материала из такого же сосуда эти закономерности не работают, в частности его расход не зависит от напора. Силы, действующие между частицами песка, переносят избыточное давление на стенки резервуара (тот же арочный эффект). Именно поэтому количество песчинок, проходящих в еди-

ницу времени через отверстие, соединяющее две колбы песочных часов, остается примерно постоянным. Скорость же вытекания воды из отверстия в банке по мере снижения уровня непрерывно уменьшается. Эти особенности зернистых материалов проявляются, в частности, при холодной дозировке каменных материалов и при выгрузке готовой асфальтобетонной смеси из накопительного бункера в транспортное средство.

Способность к сегрегации является свойством, характерным именно для зернистого материала. В технологии асфальтобетона, кроме сегрегации частиц смеси по размеру, имеет большое практическое значение также так называемая «температурная сегрегация» — неравномерность распределения температуры в объеме укладываемой и уплотняемой смеси. Большое значение имеет понимание процессов сегрегации и в технологии цементного бетона.

Закономерности сегрегации пока изучены в основном экспериментально. Тем не менее, сделан ряд остроумных изобретений, направленных на борьбу с сегрегацией. Первый патент в этой области получил американский изобретатель Thomas A Edison (изобретатель электрической лампочки с нитью накаливания и стеклянной вакуумной камерой, патрона и цоколя с винтовой нарезкой для этой лампочки, поворотного выключателя, плавкого предохранителя, микрофона, фонографа, кинокамеры и т.д.) В патенте Т. Эдисона № 775600 (1904 г.) предложена конструкция вращающейся печи для обжига цементного клинкера, в которой предусмотрены устройства, уменьшающие сегрегацию гранул клинкера по размеру и температуре.

## 1.2. Сегрегация при гравитационном течении по склону

Когда зернистый материал насыпают в виде кучи, он принимает конусообразную

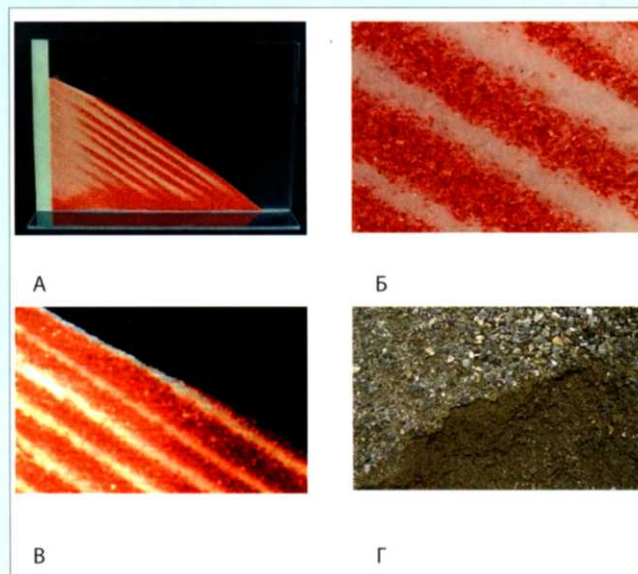


Рис. 1. Сегрегация и стратификация смеси зерен разной крупности.

А — образование слоев при отсыпке смеси равных объемов белых стеклянных шариков диаметром 0,27 мм и красных кубических кристаллов сахара размером 0,8 мм между двумя прозрачными вертикальными пластинами, расположенными на расстоянии 5 мм друг от друга;  
Б — увеличенная фотография стратифицированного участка;  
В — участок склона справа внизу на рис. 1А, где откос заканчивается;  
Г — образование слоев с зернами разной крупности при хранении каменных материалов для приготовления асфальтобетонной смеси (штат Вашингтон).

форму. Угол наклона поверхности этого конуса к горизонтальной плоскости в условиях земного тяготения называют углом естественного откоса. Этот угол зависит от зернового состава материала, формы частиц и наличия сцепления между ними. При укладке зернистого материала в штабель в результате движения частиц происходит самопроизвольная сортировка зерен по размеру, форме и массе; возникает слоистость. Характер возникающей при этом неоднородности зернистого материала имеет большое практическое значение.

Сортировка по размеру при течении зернистого материала по склону может быть объяснена следующим образом. Представьте себе камень, который катится по склону горы. Склон местами неровный. Камень может застрять в яме и больше не двигаться. Подобно камням и гравию, неровности склона тоже различаются по размеру. Какая-то впадина может остановить лишь

мелкую гальку, а большой камень перекатится через нее и по инерции продолжит свой путь дальше вниз. Что валуну кажется гладкой поверхностью, представляется весьма неровным для маленького зернышка песка. Чем меньше размеры частиц, тем большее их количество скапливается вверху склона, а более крупные камни докатываются до самого низа. Итак, при течении по склону зернистый материал может самопроизвольно сортироваться в зависимости от размера частиц.

Аналогично может быть объяснена сортировка по форме. Чем круглее предмет, тем легче он катится. Зерна песка или гравия округлой формы пройдут по склону холма большим путем, чем зерна неправильной «граненой» формы, которые более склонны к тому, чтобы остановиться на неровностях склона.

Итак, более крупные частицы проходят по склону большим путем, чем мелкие частицы. Более круглые частицы

пройдут по склону путь больший, чем частицы граненые. Но что произойдет, если будет двигаться смесь из крупных граненых частиц и мелких круглых? Докатятся ли крупные частицы до подножья холма, потому что они тяжелее, или же останутся наверху, потому что неровные? Останутся ли мелкие частицы возле вершины холма, поскольку они маленькие, или же прокатятся дальше крупных, поскольку они круглые? Налицо явное противоречие. Останутся ли разнородные частицы перемешанными и будут продолжать двигаться вместе? На деле выходит, что некоторые смеси из крупных граненых и мелких округлых зерен некоторым образом расслаиваются, или происходит их «стратификация» (от лат. *stratum* — слой).

Для пояснения явлений сегрегации и стратификации рассмотрим результаты простого опыта [2]. Две прозрачные пластины (из стекла либо плексигласа) размером 200×300 мм установлены вертикально на расстоянии 5 мм друг от друга, образуя плоскую ячейку (рис. 1). Чтобы устранить влияние электростатического взаимодействия зерен при трении о пластины, их поверхность предварительно промыли раствором антистатика. Левый конец ячейки

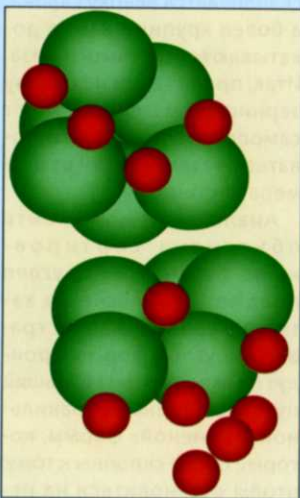


Рис. 2. Сегрегация путем просеивания мелких зерен через промежутки между крупными зернами.

закрыт, а правый — открыт. Смесь одинаковых объемов белых стеклянных шариков (диаметр 0,27 мм, угол естественного откоса 26 град.) и красных кристаллов сахара (кубическая форма, типичный размер ребра 0,8 мм, угол естественного откоса 36 град.) медленно с примерно постоянной скоростью высыпали вблизи левого конца ячейки.

Сначала смешанные зерна формируют выпуклость в виде холма. Когда холм становится крутым, он обрушивается, образуя откос. По мере движения смеси вниз по откосу мелкие круглые зерна погружаются глубже и образуют слой под крупными зернами кубической формы. Затем по мере отсыпки смеси формируется новый холмик и после его обрушения образуются новые слои. Сегрегация выражается в том, что мелкие стеклянные зерна преобладают у левой границы ячейки (на рис. 1А она светлее), а вблизи горизонтального основания откоса преобладают крупные красные зерна сахара. В средней и верхней частях вместо смеси образуется слоистая система (рис. 1Б) с расстоянием между серединами ближайших одноцветных слоев примерно 12 мм. На рис. 1В показана фотография участка справа внизу ячейки, где откос заканчивается и частицы останавливаются (рисунки 1А и 1В взяты с домашней страницы Хернанда Макси в Интернете). Сначала останавливаются мелкие белые зерна, а крупные красные продолжают двигаться. В результате слой мелких зерен оказывается под слоем крупных.

В описанном опыте наблюдали как сегрегацию, так и стратификацию. Его проводили для смеси, в которой крупные зерна имели угол естественного откоса больше, чем мелкие зерна. В другом эксперименте использовали стеклянные шарики двух сортов, подобранные так, что угол естественного откоса крупных шариков был меньше. В этом случае по-прежнему наблюдалась сегрегация зерен (мелкие преобладали в левой части

ячейки, а крупные — над горизонтальным основанием откоса). Однако стратификации не было. Испытывали также смесь зерен трех разных размеров (и разных цветов) с различными углами естественного откоса. В этом опыте получили как сегрегацию, так и стратификацию с чередованием трех полос разного цвета.

Подобные простые (и недорогие!) эксперименты позволяют понять закономерности строения штабелей щебня, гравия и песка, используемых для производства асфальтобетонных и цементобетонных смесей (рис. 1Г); отвалов горных пород на горно-обогатительных комбинатах, происхождение и строение подземных геологических структур, а также причины сегрегации асфальтобетонной смеси при выгрузке из накопительного бункера или силоса для ее хранения.

### 1.3. Сегрегация при вертикальных колебаниях

Асфальтобетонная смесь подвергается вертикальным и горизонтальным колебаниям во время перевозки, укладки, а также вибрационного уплотнения. Для предотвращения или хотя бы ослабления влияния сегрегации на структуру асфальтобетона необходимо понимать физическую природу процессов, вызывающих сегрегацию.

#### 1.3.1. Просеивание мелких частиц

Под действием вибрации с небольшой амплитудой колебаний мелкие зерна как бы фильтруются — просеиваются сквозь промежутки между крупными зернами (рис. 2). В результате нижняя зона слоя содержит больше мелких зерен, чем верхняя. В данном случае сегрегация объясняется просто стремлением зернистой системы перейти к состоянию с наименьшей потенциальной энергией в поле земного тяготения. Просеивание мелких зерен не произойдет, если промежутки между крупными зер-

нами меньше размера мелких зерен (рис. 3).

Между четырьмя одинаковыми крупными соприкасающимися шарами имеется поры с «квадратным» горлом (рис. 3А), а между тремя — с «треугольным» горлом (рис. 3Б). Малое зерно может пройти сквозь «квадратное» горло только в том случае, если диаметр малого зерна как минимум в  $1/(\sqrt{2}-1)=2,414$  раза меньше диаметра соприкасающихся больших зерен. Аналогично, малое зерно может пройти сквозь «треугольное» горло только в том случае, если диаметр малого зерна как минимум в  $(3+2\sqrt{3})=6,464$  раза меньше диаметра соприкасающихся больших зерен.

Эти простые соображения учитываются при назначении размеров отверстий стандартных сит. Чтобы данная фракция каменного материала не была подвержена сегрегации путем просеивания, т.е. чтобы она оставалась однородной смесью, размеры самых крупных и самых мелких ее частиц должны отличаться не более чем в 2,4 раза. Поэтому как стандартные российские сита (для каменных материалов: 40, 20, 15, 10, 5, 2,5, 1,25, 0,630, 0,315, 0,160, 0,075 мм; для грунтов: 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм), так и стандартные американские сита (по стандарту ASTM: 37,5, 25,0, 19,0, 12,5, 9,5, 4,75, 2,36, 1,18, 0,600, 0,300, 0,150, 0,075 мм) выбраны так, что отношение диаметра отверстия предыдущего сита к диаметру отверстия последующего сита не превышает 2,0.

#### 1.3.2. Эффект «бразильского ореха» при вертикальных колебаниях

Оказывается, большая частица из тяжелого материала, первоначально погруженная в массу малых легких частиц, под действием вертикальных колебаний постепенно поднимается на поверхность — как бы всплывает, хотя она и тяжелая. В статьях о сегрегации это явление получило название эффекта «бразильского ореха». Дело в том, что в США повсеместно продают смесь различных

орехов (бразильские, арахис, кешью, миндаль, фундук), расфасованную в закрытые банки. Перед тем как попасть на прилавок, банка, очевидно, подвергается сильной тряске в автомобиле или железнодорожном вагоне при доставке с фасовочной фабрики в магазин. И если открыть банку со смесью орехов разных сортов, чаще всего наверху оказываются именно бразильские орехи — самые тяжелые и крупные в смеси. Почему это происходит?

Следующее простое объяснение этого эффекта, предложенное 30 лет назад [3], недавно подтвердилось путем моделирования на компьютере [4]. Пусть большой шар уложен на дно стакана, а малые отсыпаны поверх него (рис. 1А). При действии вертикальных колебаний все шары находятся в сложном и беспорядочном движении: они приподнимаются, сталкиваются друг с другом, опускаются и т.д. При этом на короткие промежутки времени в системе образуются воздушные поры. Под действием силы тяжести и вибрации в каждую такую пору немедленно устремляется малый шарик. Вероятность образования временных больших пор гораздо меньше, чем малых. Поэтому во временных порах недостаточно места для размещения большого шара. Как только большой шар приподнимается при вибрации, в освободившееся под ним место перемещаются малые. В освободившееся же под малым место большой шар не помещается. Получается, что большой шар постепенно перемещается вверх (рис. 1Б).

Однако описанный простой механизм «всплывания» большого шара в среде малых шаров оказался не единственным. Было обнаружено [5], что малые шары как бы стекают вниз вдоль стенок, и этот поток, поднимаясь затем в центральной части сосуда, перемещает большой шар вверх (рис. 5). Тогда получается, что на эффект влияет также форма и размеры сосуда. Это является существенной информацией для специали-

стов, занимающихся разработкой виброуплотняющих средств.

В начальном состоянии (слева) большой шар был уложен на слой окрашенных малых шаров. Всего через два цикла вертикальных колебаний (центральный рисунок) расположенные вблизи стенки окрашенные малые шарики сместились относительно стенки вниз. После дальнейшей вибрации окрашенные малые шарики, находившиеся вблизи стенки, опускаются вниз, достигают дна, а затем перемещаются в центр и начинают подниматься (правый рисунок). В результате большой шар и малые шары, расположенные вблизи него в центральной зоне сосуда, поднимаются.

**1.3.3. Обратный эффект «бразильского ореха» при вертикальных колебаниях**

Как только научная общественность облегченно вздохнула, что есть уже два понятных физических объяснения эффекта бразильского ореха [4,5], появилась статья [6], в которой утверждалось, что есть и обратный эффект. Оказалось, что хотя большое тяжелое зерно, погруженное в зернистый материал малых зерен, «всплывает» под действием вертикальных колебаний, такое же большое, но легкое зерно под действием этих колебаний «тонет» (при достаточно больших «глубине» слоя малых зерен и амплитуде колебаний). Это противоречило как объяснениям, иллюстрируемым рисунками 4 и 5, так и здравому смыслу. Ученые, так сказать, достигли нового, более высокого уровня непонимания явления сегрегации.

Авторы статьи [6] использовали в каждом опыте большое зерно, первоначально погруженное в зернистый материал из малых зерен — стеклянных шариков с диаметром 0,2 мм. Большое «зерно» имело яйцевидную форму и представляло собой пластмассовую оболочку, заполненную стальной дробью. Дробинки прикрепляли внутри оболочки с помощью шпаклевочной мастики.

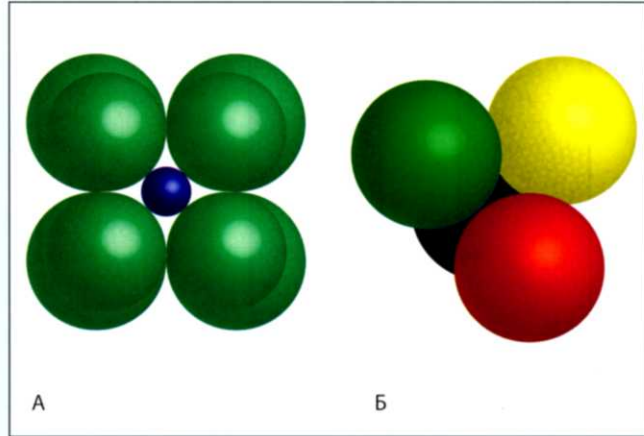


Рис. 3. «Горло» поры между четырьмя и тремя соприкасающимися шарообразными зернами:  
А — четыре соприкасающихся зерна;  
Б — три соприкасающихся зерна.

Следили за равномерностью распределения дробинки в оболочке. Приготовили несколько больших зерен разного веса. Вес больших зерен регулировали количеством дробинки в оболочке. Таким путем получили большие зерна одной и той же формы и размера, с одинаковой текстурой поверхности, но различной массы. Приготовленные большие зерна имели среднюю плотность (отношение массы зерна к его объему) в пределах от 50 до 200 % от принятой за 100 % средней плотности стеклянного зернистого материала (отношение массы зерен к занимаемому ими объему включая воздушные поры).

По аналогии с жидкостью можно было ожидать, что большое зерно с плотностью менее 100 % будет всплывать в «разжиженном» вибрацией мелком зернистом материале. Оказалось, однако, что при достаточно большой амплитуде вибраций и глубине слоя зернистого материала легкие зерна с плотностью 50 % опускались на дно сосуда и оставались на дне, а зерна с плотностью 120-170 % всплывали на поверхность и на ней оставались.

Надо сказать, что статья [6] (как и [5]) вышла в самом престижном из американских журналов по физике — Physical Review Letters, издаваемом Американским фи-

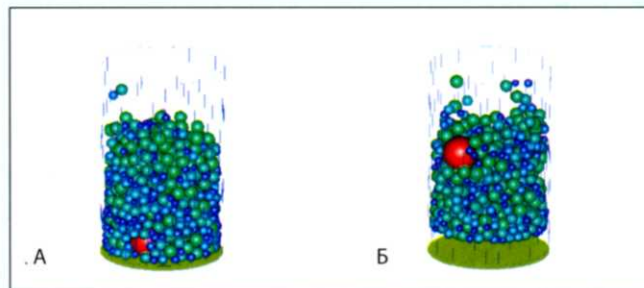


Рис. 4. При вертикальных колебаниях большое зерно перемещается вверх. Результаты компьютерного моделирования методом молекулярной динамики. Смесь состояла из 1000 шариков диаметром 0,5–1 мм и одного — диаметром 2,5 мм. На внутренних стенках стакана моделировалась текстура в виде полусферы диаметром 1 мм. Плотность материала всех частиц — 2 г/см<sup>3</sup>, коэффициент трения между шарами — 0,2, частота колебаний — 20–50 Гц:  
А — начальное состояние;  
Б — через некоторое время после начала вибрации.

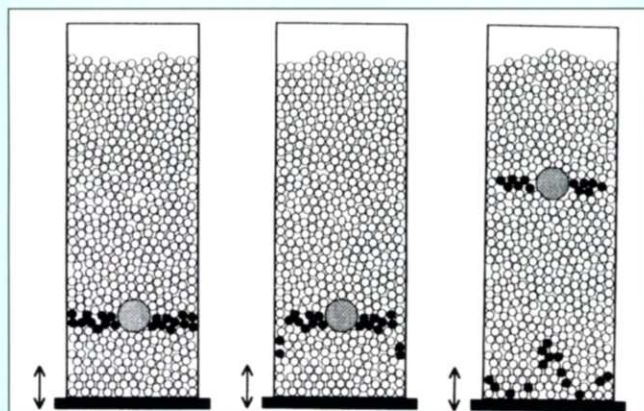


Рис. 5. Нисходящее течение малых шаров вдоль стенок приводит к восходящему их потоку в центральной части сосуда, поднимая большой шар.

зическим обществом. В нем публикуют только материалы, представляющие интерес в разнообразных областях знаний и содержащие существенную научную новизну. Объем статьи в этом журнале не превышает 4 страниц, срок публикации — обычно менее 6 месяцев, что важно для автора, желающего зафиксировать свой приоритет. За публикацию статьи автор должен заплатить издателю 710 долл., а если он хочет сделать иллюстрации цветными — 1900 долл. за 4 страницы. Тем не менее, свыше 60% представленных статей редакция отклоняет. Каждую статью посылают на анонимный отзыв двум весьма квалифицированным специалистам. На рецензию дается неделя. Состав рецензентов обновляется каждые 3 года. История публикации статьи [6] в этом престижном журнале отражает современный уровень знаний в области сегрегации. Эта история описана в самом престижном английском общенаучном журнале Nature [7].

Рецензенты дали отрицательное заключение на рукопись статьи [6], указав, что приведенные в ней результаты опытов недостоверны. Затем редактор раздела «Динамика жидкости», прочитав статью, тоже пришел к выводу, что обратный эффект бразильского ореха противоречит его интуиции. Он отправился в свою лабораторию, взял стеклянную банку, за-

полнил песком ее нижнюю половину, уложил на поверхность песка стальную гайку и большой пластмассовый болт, насыпал песок поверх этих предметов, накрыл банку и встряхнул ее несколько раз. Тяжелая стальная гайка «всплыла», легкий пластмассовый болт «утонул» в песке, а статья [6] была немедленно опубликована.

Недавние исследования позволили примерно оценить, при каких соотношениях диаметров и масс большая частица будет всплывать, а при каких тонуть. Например, если зерно Б большое, а зерна М малые, и большое зерно первоначально находится посередине, то его дальнейшее перемещение зависит от соотношения  $k = (d_B/d_M)^2 / (m_B/m_M)$ , где  $d$  — диаметры зерен,  $m$  — их массы. При  $k > 1$  большое зерно будет подниматься, а при  $k < 1$  — опускаться [8]. Например, при  $(d_B/d_M) = 2$  и  $(m_B/m_M) = 2$  большое зерно будет подниматься (эффект бразильского ореха), а при  $(m_B/m_M) = 6$  — опускаться. Если же значение  $k$  близко к единице, вертикальные колебания мало влияют на сегрегацию такой «смеси». Это соотношение является ориентировочным, поскольку поведение смеси зависит также от амплитуды и частоты колебаний, трения между частицами, расположения сосуда в поле тяготения и начальной высоты большого зерна над дном сосуда [9].

### 1.3.4. Разделение сухой бинарной смеси на составляющие при вертикальных колебаниях

Идея «бразильского ореха» получила продолжение в работах [10,11]. В первой из них был поставлен физический эксперимент, а во второй такой же эксперимент был смоделирован на компьютере. Смесь состояла из бронзовых шариков размером 0,090–0,120 мм и стеклянных

шариков такого же размера, взятых в объемном соотношении 25 и 75%. Плотность бронзы 8,9 г/см<sup>3</sup>, стекла 2,5 г/см<sup>3</sup>. Их динамические углы естественного откоса были близки: 23,4 и 23,9 град., соответственно.

Тщательно перемешав смесь, ее уложили горизонтальным слоем толщиной 20 мм в сосуд шириной 40, высотой 50 и глубиной 10 мм. Вертикальные колебания характеризовали параметром

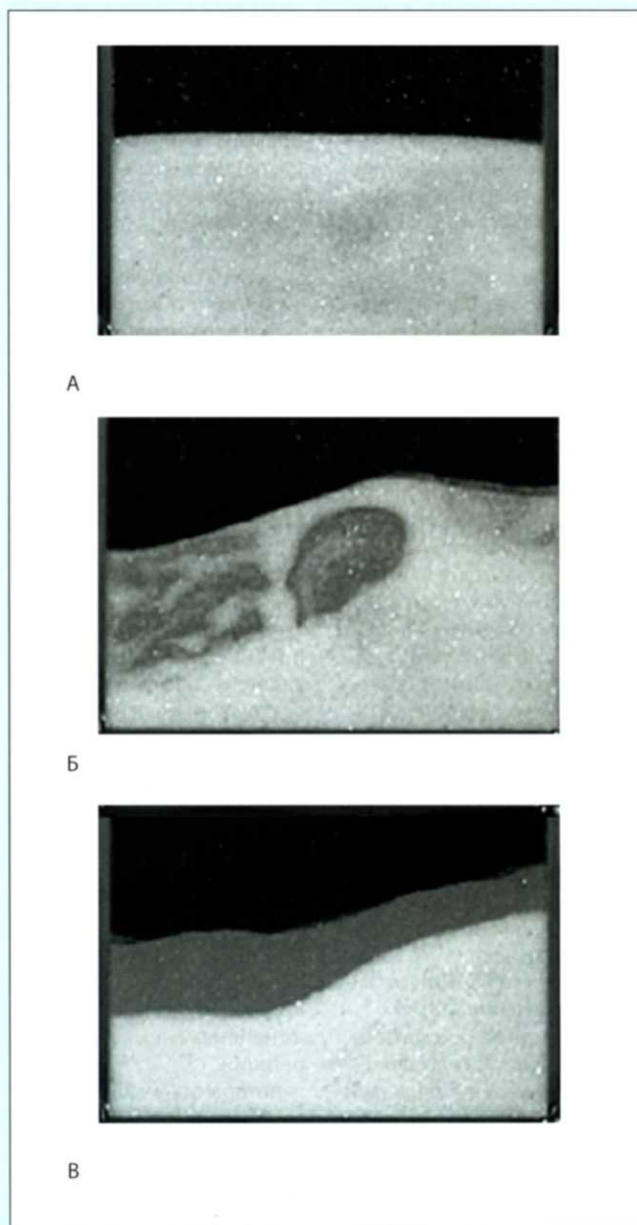


Рис. 6 Сегрегация смеси бронзовых и стеклянных зерен при вертикальных колебаниях [10].

- А — однородная смесь бронзовых и стеклянных шариков диаметром 0,090–0,120 мм до начала колебаний;
- Б — через 8 циклов колебаний с частотой 40 Гц;
- В — через 750 циклов колебаний.

