

УДК 538.9:539.215

О.И. Герасимов, д.ф.-м.н.

Одесский государственный экологический университет

ФИЗИКА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ЧАСТЬ 1.

Работа открывает серию статей, посвященных обзору состояния исследований в актуальном стремительно развивающемся направлении современной физики мягкой материи: физике гранулированных материалов, проявляющих уникальные, промежуточные по отношению к известным агрегатным состояниям: газам, жидкостям, аморфным и твердым телам и представляющих собой сложные, многочастичные, существенно нелинейные, динамические диссипативные микромеханические системы.

В части первой освещаются некоторые типичные, зачастую экстраординарные как структурные так и динамические свойства, а также обсуждаются отдельные направления их исследований. Дискутируются проблемы и перспективы развития общей теории и методов физического и численного моделирования таких материалов, их адекватность, а также намечаются темы и вопросы, которые планируется осветить в предстоящей серии обзоров.

Ключевые слова: динамические диссипативные системы, мягкая материя, гранулированные материалы.



Самое сложное находясь в центре пустыни, это найти песок ...

Настоящая работа открывает серию публикаций, посвященных описанию современного состояния исследований и перспектив их развития и применения в новой, стремительно развивающейся области физики, связанной с изучением физических свойств гранулированных материалов (ГМ) являющейся составным компонентом оформившегося в последнее время направления - физики мягкой материи. Перечень тем, на которых сфокусированы усилия теоретиков и экспериментаторов в этой области впечатляет как широтой охвата, так и концептуальной глубиной проработки ее положений. Если к этому добавить без преувеличения экстраординарный характер чуть ли не большинства основных проявляемых гранулированной материей свойств, а также возможность их исследования с помощью наблюдений практически невооруженным глазом уникальный характер этой отрасли физики становится очевидным. Глобальный масштаб, в котором представлены гранулированные материалы в окружающей среде превращает задачу понимания законов их поведения в истребованную уже с точки зрения обеспечения самой безопасности жизнедеятельности человечества. В качестве примера, иллюстрирующего отмеченное обстоятельство на рис.1,2,3 приведены лишь некоторые катастрофические ситуации связанные с проявлением гранулированной материей ее отдельных, уникальных с точки зрения физики и катастрофически опасных для общения с ними свойств (распространяющиеся дюны в пустыне, “поедающие” оазисы цивилизации, неупругий коллапс и связанные с ним критические напряжения, вызывающие разрушения конструкций емкостей хранения, вязкоупругие свойства зыбучих песков). И это только незначительная часть в перечне подобных свойств и связанных с ними явлений!



Рис.1 – Неупругий коллапс в емкости хранения цемента расположенной вблизи маневровой железнодорожной магистрали.

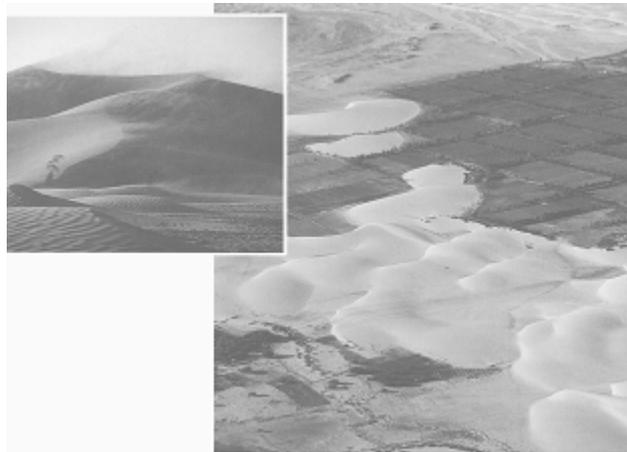


Рис.2 – Перемещающиеся дюны в пустыне способны уничтожить оазисы цивилизации.



Рис.3 – ”Тонущий” в зыбучих песках автомобиль.

Как уже говорилось, исследования структуры и физических свойств гранулированных материалов (ГМ) составляют весьма значительную часть усилий физиков, как теоретиков, так и экспериментаторов [1-4]. Среди причин, приведших к такой концентрации усилий обычно указывается проявление ГМ необычных для типичных агрегатных состояний вещества свойств. И действительно, например, такие явления как, скажем, флюидизация сухих ГМ под действием внешних полей (осыпание наклонных насыпей), насыщение давления в вертикальной емкости,

содержащей ГМ (эффект “арки”), сегрегация (разделение сухих смесей, например, эффект “бразильского ореха”) и некоторые другие проявляются только в ГМ.

Интерес к изучению ГМ также обусловлен важностью понимания их физических свойств для рационализации промышленного производства и возможностью создания на их основе принципиально новых наукоемких технологий. ГМ широко представлены в окружающей среде и используются в производстве (пудра, песок, цемент, графит, уголь, зерно, сыпучие порошки и смеси в пищевой, строительной и химической промышленности, металлургии, почва и даже Вселенная – вот далеко неполный список такого рода применений). По некоторым оценкам, более 60% всего мирового промышленного производства полностью основано или частично использует ГМ различной дисперсности: от микро-пудр с размерами гранул порядка нескольких микрон до геологических структур с размерами отдельных каменных монолитов в несколько метров и более. Наконец Вселенная, с некоторыми оговорками, также может быть отнесена к одному из примеров разреженных гранулированных систем (гранулированный газ).

Многие уникальные свойства гранулированной материи наблюдались достаточно давно. В этой связи, достаточно упомянуть наблюдение Фарадеем нелинейных волн на поверхности песчаного слоя, помещенного в поле виброускорений, осуществленное им около 160 лет тому назад.

Материалы, с которыми мы сталкиваемся в нашей повседневной жизни, мы обычно классифицируем с точки зрения их агрегатного состояния как газы, жидкости или твердые тела. А к какому из перечисленных состояний конденсированной материи можно отнести гранулированную среду? Ведь она может «течь» с наклонной плоскости как лавина или принимать форму сосуда, куда мы ее помещаем (насыпаем) подобно жидкости. Каждая, отдельно взятая гранула, скажем песок, безусловно – твердое тело, однако конгломерация гранул уже показывает свойства совершенно нетипичные для обычных агрегатных состояний (и для твердых тел в частности).

Поведение гранулированных материалов при манипуляциях над ними действительно выглядит совершенно специфично. Так, например, если медленно насыпать песок на подложку, то холм будет расти, сохраняя конусообразную форму, пока угол у основания раствора не достигнет некоторого критического значения. После достижения этого критического параметра начинается осыпание верхних слоев насыпи, которое внешне напоминает лавину. Причем в лавинообразном движении принимают участие лишь частицы, принадлежащие слою некоторой толщины – вблизи поверхности конусообразной насыпи, в то время как остальной массив остается в состоянии покоя. Очень многие материалы, окружающие нас в повседневной жизни и составляющие основу различных отраслей индустрии (строительной, химической, фармакологической, пищевой) находятся как раз в гранулированном состоянии. Вообще, среди потребляемых и используемых человечеством материалов в подавляющем большинстве, на той или иной стадии производства, обработки или потребления, находятся, главным образом, либо в жидком, либо в гранулированном состоянии.

Тем более удивительно, что понимание физической природы многих процессов, происходящих в гранулированных процессах, до сих пор отсутствует или достигнуто частично. Такое положение дел привело даже к тому, что некоторые производства, использующие гранулированные материалы, встретились с явлениями, которые возможно объяснить лишь признав существование специфических свойств гранулированных материалов (неупругий коллапс), проявляющихся под воздействием внешних возмущений.

Мы, например, на собственном опыте можем легко убедиться, что смоченный некоторым количеством воды песок, способен удерживать форму конструкции (песчаные замки, которые дети с удовольствием возводят на пляже). Та же самая вода, но уже в большем количестве, способна размыть конструкции из сырого песка, лишив ее устойчивости. Известно, что во время землетрясения мокрые грунты плывут подобно жидкостям. А, скажем, с явлением, получившим название «зыбучие пески», хорошо знакомы, по крайней мере, те из нас, кто рискнул передвигаться по песчаному грунту (например, в пустыне) на транспортном средстве.

Таким образом, помимо перспектив эффективного применения гранулированных материалов в связи с их уникальными свойствами, в технологиях, развитие фундаментальной

теории, которая позволила бы понять и предвидеть особенности их поведения, является весьма актуальной задачей.

На первый взгляд, построение физической теории в основной своей части должно учитывать три следующих аспекта:

Трение между частицами, собственно обуславливающее диссипативный характер системы и, как следствие, ее необычное (нелинейное) поведение зависит от природы, формы, размеров частиц – гранул, а также от среды, в которую они помещены (например, вода).

Свойства и поведение гранулированных материалов часто напоминают статистические, хотя по своей природе гранулированный материал – механическая система, показывающая коллективное поведение изоморфное статистическому, вследствие своей нелинейности. Именно «коллективный характер» поведения гранулированных материалов имеют ввиду, когда употребляют термин «статическая механика гранулированных материалов». На самом деле речь идет о коллективном их поведении внешне изоморфном поведению статистически заданных систем.

Сказанное становится понятным, если заметить, что в упакованном состоянии в гранулированном материале каждая отдельная частица касается только нескольких ближайших соседних гранул – частиц (находящихся в т.н. первой, или ближайшей координационной сфере). Такая система с, так называемым, ближним порядком в локальной структуре, вследствие нелинейности, обусловленной диссипативными процессами, глобально ведет себя в существенной зависимости именно от локальной степени упорядоченности. Следует заметить, что влияние диссипативных эффектов зачастую столь маскировано наглядно проявляемыми свойствами свободного объема, незанятого гранулами в ходе динамики, что именно этот последний эффект объявляется ответственным за формирование макроскопических свойств гранулированных материалов. На самом деле, нелинейные сценарии в поведении гранулированных материалов, такие скажем как поверхностные возбуждения (волны, осциллоны, левитирующие слои и многие другие) обязаны своим происхождением именно диссипативным процессам.

Как уже говорилось выше, гранулированные материалы могут (при специальных условиях) проявлять отдельные свойства жидкостей. Впрочем, следует отметить, что речь идет все-таки о свойствах не вполне обычных (сухих?) жидкостях. Например, слой гранул в вертикальном поле виброускорений демонстрирует коллективное явление всплывания парящей капли жидкости над подогретой подложкой (получившее название аналога эффекта Лейденфроста), имеющее совершенно самостоятельную физическую природу, отличную от своего классического прототипа.

Более толстый слой гранул на однородно возмущаемой в вертикальном направлении горизонтальной подложке покрывается сеткой ячеек (паттернов), имеющих симметрию (например – гексагональную), зависящую от условий возбуждения, толщины слоя и типа гранул. Явление, напоминающее вышеописанное наблюдается во время тектонических явлений на поверхности грунтов, причем «жидкая» гранулированная фаза сосуществует с «твердотельной». Описанное свойство внешне выглядит изоморфно по отношению к явлению формирования ячеек Бенара при конвективной неустойчивости в подогреваемом снизу слое жидкости в гравитационном поле, хотя, как понятно, имеет совершенно иную физическую природу.

Сходное по природе явление, которое условно можно было бы назвать «вскипанием», наблюдалось в направленно возмущаемом вертикально горизонтальном слое гранулированного материала (металлические дробинки). Это явление получило название осцилона. При некоторых условиях осцилоны возникают парами и даже группами, демонстрируя очевидный нелинейный характер явления.

Все перечисленные выше примеры, а также многие другие, которые не были упомянуты, но известны нам из повседневного общения с гранулированными материалами в лабораторных условиях и в окружающей среде, позволяют считать такие системы уникальной лабораторий для изучения природы локального упорядочения и равновесия, а также формирования упорядоченных структур в мезо- и в макро-масштабах, что является одним из ключевых вопросов физики конденсированного состояния вещества. Можно сказать, что природа открывает нам возможность изучить возможность существования уникального

скейлинга при масштабировании структуры материи! Масштабность применения гранулированных материалов в различных производственных технологиях, низкая энергоемкость в манипулировании ними, а также их присутствия в натуральном виде в окружающей среде впечатляет и не оставляет сомнений в важности изучения их структуры и динамики поведения во внешних полях различной природы, понимания механизмов формирования их свойств и возможности управления ними. Перейдем теперь к обсуждению методов, которые применяются для изучения отдельных наблюдаемых свойств гранулированных материалов, помещенных в различные внешние условия.

Несмотря на наличие многочисленных исследований, еще до сравнительно недавнего времени существовало весьма ограниченное понимание тех физических законов, которые лежат в основе наблюдаемых в ГМ эффектов и явлений. Можно сказать, что и до настоящего времени не существует общепризнанного теоретического подхода к описанию многих наблюдаемых физических свойств ГМ. Известный прогресс в их изучении достигнут на пути численного моделирования отдельных свойств на основе физических моделей, экстраполированных из статистической физики, физики твердого тела, физики сплошной среды, а также из теории динамических систем [5- 24].

Перед тем, как перейти к описанию исследований, которые в настоящее время интенсивно осуществляются на пути изучения физических свойств гранулированной материи, еще раз кратко напомним некоторые из ее общих признаков. Гранулированные системы представляют собой конгломераты из большого числа дискретных макроскопических (с дисперсией от нескольких микрон до километров!) частиц, взаимодействующих лишь посредством сил отталкивания. Их внешняя форма полностью определяется заданием граничных условий (например, формой объема включения) и(или) действием внешних полей (например – гравитационных). Существенным является то, что действующие между гранулами в точке контакта силы отталкивания являются по своей природе диссипативными (например, даже в состоянии покоя, действуют силы герцевского статического трения). Гранулированный материал, таким образом, представляет собой неравновесную, нелинейную, диссипативную, многочастичную механическую систему, динамика которой, требует, вообще говоря, специального определения и безусловно относится к числу в равной степени актуальных и исключительно сложных задач современной физики.

Вследствие своей физической сложности, гранулированные материалы, несмотря на кажущуюся внешнюю простоту (ну что, в самом деле, может быть проще песка, который мы привычно ощущаем ступая по пляжу, или растворимого кофе и ложки сахара к нему?), вообще говоря, ведут себя отличным образом по сравнению с газами, жидкостями и твердыми телами, хотя при некоторых внешних условиях и могут проявлять отдельные признаки вышеперечисленных типичных агрегатных состояний.

Необходимо постоянно помнить, что любое наблюдаемое поведение гранулированного материала, внешне напоминающее поведение газа, жидкости, твердого тела – это на самом деле динамическое явление (ведь гранулированная материя это механическая система!). Такие, внешне изоморфные свойствам конденсированной сплошной среды явления, происходят только при определенных специальных условиях, например, определенных уровнях интенсивности поступления энергии в систему, степени и симметрии упаковки гранул, их морфологии, граничных условий объемов включения и др. Заметим, также что вследствие неупругости столкновений, между гранулами, и соответственно, имеющих место потерь энергии, гранулированные материалы возмущаемые извне практически сразу переходят в состояние покоя после того, как прекращается подвод энергии. К примеру, отдельная частица, упавшая на подложку, даже неупруго отражаясь от нее, подскакивает в течение некоего времени, прежде чем остановиться. В то время как такие же гранулы насыпанные в мешок, упав вместе с ним на подложку практически сразу останавливаются. Приведенный пример, контрастно демонстрирует отличие коллективного поведения большого числа гранул от индивидуального (одной гранулы), причиной которого выступают неупругие столкновения между гранулами, ведущие к диссипации полной энергии в системе.

Прогнозирование свойств, проявляемых ГМ при различных внешних воздействиях может основываться на моделировании их поведения с помощью теоретических моделей и численных расчетов. Сложность состоит в том, что достаточно непросто осуществить

последовательный расчет взаимодействия даже двух частиц, имеющих сложную форму поверхности и отличающихся размерами. Часто для упрощения задачи, принимают, что частицы имеет форму твердых сфер, на них действуют силы тяжести, статического или динамического трения, вязкоупругости. Силы, действие которых испытывают частицы ГМ, - это силы пластической деформации. Для расчета сил, которые связаны с диссипацией энергии, необходимо знать параметры характеризующие материал гранул (такие, например, как модуль Юнга, постоянная Пуассона). Более или менее реалистическое моделирование гранулированных систем требует учета многократных столкновений большого числа частиц, что таким образом, увеличивает требуемые ресурсы машинного времени.

Вследствие диссипации энергии в гранулированной системе за счет герцевского трения, она находится в неравновесном состоянии даже в условиях отсутствия какого-либо движения системы как целого или отдельных ее элементов. Поэтому стандартные методы механики или статистической физики не могут быть непосредственно применены для описания происходящих в ГМ процессов. Модели основанные на представлениях о сплошной среде, также выглядят, в общем случае, неадекватными в применении к ГМ, так как последние являются существенно дискретными. Применение гидродинамического подхода к описанию флюидизированного поведения гранулированных систем, наблюдаемого в специальных условиях, хотя и используется для параметризации, скажем стекания гранулированных потоков с наклонных поверхностей, однако с точки зрения общей теории носит достаточно искусственный характер.

Вышеотмеченные обстоятельства превращают задачу общего теоретического описания гранулированных материалов, одновременно в сложную и интригующую проблему современной физики, смежных с ней прикладных (инженерных) дисциплин. В настоящее время теория динамических диссипативных систем, пока еще далека от завершенной формы и решение этой задачи, таким образом, должно способствовать расширению концептуальной базы физики.

Для сравнения, напомним, что в случае скажем теории жидкостей, которая получила общую формулировку благодаря работам Боголюбова, Борна, Кирквуда, Грина, Ивона (ББКГИ) [25], и многих других исследователей, мы сталкиваемся с принципиально иной проблемой: которая состоит в поиске адекватных математических методов интегрирования изначально корректно сформулированной задачи, в виде зацепляющихся нелинейных интегро-дифференциальных уравнений для многочастичных функций распределения частиц ББКГИ. Отсутствие общей теории динамических диссипативных систем в гранулированных фазах делает актуальным применение в том числе простых наглядных (приближенных) моделей и числовых методов для изучения физических процессов, которые происходят в ГМ при различных внутренних и внешних условиях [5-24].

Исследования различных физических моделей гранулированных систем, находящихся в поле тяжести и виброускорений, методами численного моделирования, позволяют получать данные о динамике их поведения.

Скажем метод молекулярной динамики (или дискретной компьютерной механики, как его еще называют) заключается в расчете движения каждой отдельной частицы из конгломерации на основе формализма механики Ньютона. Численное моделирование (эксперимент) включает также методы Монте-Карло и клеточных автоматов. На этом пути достигнут заметный прогресс в описании структуры и отдельных динамических свойств ГМ.

Существенный интерес составляют исследования процессов кластеризации в ГМ. Некоторые наблюдаемые в непосредственных физических экспериментах и относящиеся к этому классу явления выглядят интригующими и до настоящего времени не до конца понятными. Здесь стоит упомянуть, в указанной связи, эксперименты по исследованию поведения (кластеризации) гранулированных материалов, которые проводятся в космическом пространстве в условиях пониженной и полностью отсутствующей гравитации в ходе которых было экспериментально подтверждено существование в ГМ специфического типа кластеризации, известного под названием неупругого коллапса (состоящего в том что неупругие потери в гранулированных материалах могут приводить к режиму с бесконечным числом соударений за конечный промежуток времени). Сценарии поведения гранулированного материала в состоянии коллапса оказываются весьма разнообразными: от простейшего до

неоднородного. Коллапс в диссипативных системах приводит к появлению наблюдаемых, как непосредственно в экспериментах с ГМ, так при их численном моделировании, длинных, нитеподобных, уплотненных распределений частиц, а не к кластерам со сферической симметрией в распределении массы, как это можно было бы ожидать с точки зрения представлений теории среднего поля. Отметим в скобках, что симметрия наблюдаемых нитеподобных кластеров напоминает распределение галактик в видимой части Вселенной.

Физической причиной этого явления является неупругий характер соударения между частицами, ведущий к диссипации энергии и, как следствие, к нелинейному сценарию поведения.

И если каноническая задача о коллапсе в случае скачущего шарика над подложкой в поле гравитации часто интерпретируется как артефакт численного счета, то в ГМ такие состояния можно считать наглядно проявляемыми в ходе наблюдаемой в них кластеризации.

Весьма перспективным возможным применением этого явления, наблюдаемого лишь в ГМ, в промышленных технологиях может стать разработка технологии сухого синтеза с прогнозируемыми физико-механическими свойствами.

К эффектам, наблюдаемым и соизмеримым в смысле важности их практических приложений, относится явление сегрегации (разделения) сухих гранулированных смесей происходящее под действием вибровоздействий (а также производный от него эффект Бразильского ореха).

Таким образом, изучение гранулированных материалов охватывает широкий перечень явлений, происходящих в масштабах от лабораторного до астрономического, пояснение которых, зачастую кажется, бросает вызов канонической мудрости физики.

В частности, такие вопросы как: является ли явление неупругого коллапса чем-то большим, нежели красивая теоретическая концепция, или же это математический артефакт; имеет ли данное явление реальные экспериментальные подтверждения; возможно ли установить экспериментально различие между неупругим коллапсом и неупругой кластеризацией в общем виде, и многие другие еще ожидают своего разрешения.

Некоторые идеи и методы, которые развиваются при исследовании гранулированных материалов также могут применяться при изучении сложных статистических систем, в формировании свойств которых существенную роль играют метастабильные состояния. Это фаза пены, химически реагирующие системы, коллоидные растворы, запыленная плазма и некоторые другие.

Среди первоочередных задач стоящих перед исследователями гранулированной материи, помимо концептуальных и гносеологического характера, направленных на понимание общих физических принципов лежащих в основе наблюдаемых явлений, является развитие физических моделей адекватных отдельным воспроизводимо наблюдаемым свойствам гранулированных материалов различного типа при заданных внутренних и внешних условиях.

На пути построения таких простых, наглядных моделей, допускающих численное, а в ряде случаев и аналитическое решение, и, как уже говорилось, адекватных тем или иным чертам, наблюдаемых в гранулированных материалах эффектов развиваются, например, подходы, описывающие динамические явления типа компактизации и сегрегации в гранулированных материалах, концептуальные подходы использующие элементы нелинейной кинетики динамических диссипативных систем к структуризации и дефектообразованию под действием внешних возмущений, а также разрабатываются численные алгоритмы моделирующие наблюдаемые явления в ГМ.

В последующих разделах обзора будут проанализированы исследования некоторых свойств, открывающих перспективы построения как теоретических концепций так и новых технических приложений гранулированных материалов, а именно:

- неоднородная кластеризация в одномерных моделях неупруго сталкивающихся частиц; квази-стационарные состояния и неравновесные переходы между ними; динамическая природа неупругой кластеризации (коллапса);
- особенности асимметричного распространения возмущений (например, волнового типа) в гранулированных системах моделируемых низкоразмерными распределениями силовых центров с учетом эффектов беспорядка и диссипативных потерь, а также декорирования;

- медленні критичні моди в релаксації поля щільності (компактизації) в кінетичному сценарії компактизації (сегрегації), оснований на емпіричних підходах (типа Ландау-Гінзбурга (Канна-Хильярда)) к опису кінетики адекватно визначеного поблизу асимптотических квазістаціонарних станів поля параметра порядку і порівняльна оцінка ролі ефектів виключеного об'єму і неупругих втрат.

Як би ні були важливі і цікаві самі по собі загальні питання теорії нерівноважних, дисипативних, мікро-механіеских систем, якими, як уже говорилося, є гранульовані матеріали, на шляхи їх застосування на практиці, в разі реальних ГМ, нас чекають проблеми, пов'язані з необхідністю врахування матеріальних співвідношень: впливу параметрів, що характеризують як морфологію, геометрію дисперсії і фізичні властивості самих гранул так і геометрію і властивості меж об'єму включення, розмірність і численні інші, що в кінцевому рахунку і визначає можливості і шляхи їх застосування. Розвиваємі фізичні моделі повинні таким чином враховувати специфічні внутрішні, початкові і зовнішні умови в яких реалізується структура і розвивається динаміка ГМ. В цьому напрямку і будуть орієнтовані майбутні розділи огляду.

Список літератури

1. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The physics of granular materials. //Rev.Mod.Phys.-1996.- Vol.68.- P.1259-1272.
2. Duran J. Sands, powders and grains.-New York: Springer-Verlag, 2000.-200p.
3. Kadanoff L. Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows. // Rev.Mod.Phys.-1999.- Vol.71.-P.435-447.
4. de Gennes P.G. Granular matter: a tentative view. // Rev.Mod.Phys.-1999.- Vol.71,S.- P.374-385.
5. Герасимов О.І., Снівак А.Я., Худинцев М.М., Клименков О.А. Транспорт енергії (імпульсу) в модельних низьковимірних дисипативних системах. //Вісник ОДЕКУ.-2008.-№6.-С.225-233.
6. Герасимов О.І., Ванделлє Н., Снівак А.Я., Худинцев М.М., Люмс Г., Дорболо С., Клименков О.А. Стационарні стани у 1D моделі системи неупругих частинок. //Укр. фіз. журн. – 2008. – Т.53, №11.-С.1129-1137.
7. Герасимов О.І. Структура та динаміка гранульованих матеріалів. //Доповіді НАН України.-2010.-№11.-С.59-65.
8. Gerasymov O.I. Structure and dynamics of granular materials perturbed by external fields. //Ukr.Journ.Phys.-2010.-Vol.55, №5.-P.560-567.
9. Герасимов О.І., Сомов М.М. Локальна структура гранульованих матеріалів. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№10.-С.221-225.
10. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Кінетична дисперсійна модель середнього поля для ущільнення гранульованих матеріалів. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№9.-С.190-197.
11. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Кінетична модель ущільнення у гранульованих матеріалах. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№10.-С.266-231.
12. Герасимов О.І. О новом классе точных решений дифференциально-разностного уравнения движения для механических возмущений в одномерной неоднородной гранулированной цепочке. //Вісник ОДЕКУ.-2011.-№11.-С.198-202.
13. Герасимов О.І., Сомов М.М. Стереологічний аналіз локальної структури гранульованих матеріалів (метод Вороного). //Вісник ОДЕКУ.-2011.-№12.-С.215-219.
14. Герасимов О.І., Ванделлє Н. Щодо точних розв'язків задачі про перенесення імпульсу у неоднорідному гранульованому ланцюжку. //Доповіді НАН України.-2012.-№8.-С.67-72.
15. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Моделювання руху механіесних збуджень у одновимірних неоднорідних гранульованих ланцюжках: вплив граниесних умов. //Вісник ОДЕКУ.-2012.-№14.-С.217-223.
16. Герасимов О.І., Сомов М.М. Ентропійна модель для опису вертикального профілю щільності у гранульованих матеріалах у гравітаційному полі. //Вісник ОДЕКУ. – 2012.-№14.-С.224-228.

17. G. Lumay, S. Dorbolo, O. Gerasymov and N. Vandewalle, Experimental study of a vertical column of grains submitted to a series of impulses. //Eur. Phys. J. E -2013.-Vol.36, N16. (6 page) DOI 10.1140/epje/i2013-13016-1
18. Герасимов О.І., Загородній А.Г., Сомов М.М. Щодо аналізу структури гранульованих матеріалів. //Укр.фіз.журн. – 2013.-Т.58, №1.-С.32-39.
19. Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M. Differential equation of state of a model system with a singular measure: application to granular materials in steady states. //Physica A.-2002.-312.-P.172-180.
20. Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M, Kitahara K. Kinetics of granular segregation. //Ukr.Journ.Phys.-2003.- Vol.48, N8.-P.885-896.
21. Gerasymov O.I., Khudintsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya. The kinetics of processes occurring in granular materials in the field of vibroaccelerations. //Ukr.Journ.Phys. -2005.- Vol.50, №6. -P.624-632.
22. Gerasymov O.I., Khudyntsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya. Kinetics of driven granular materials. //Bogolyubov Kyiv Conference: Modern Problems of Mathematics and Theoretical Physics (13-17 September 2004, Kyiv, Ukraine). -P.63.
23. Герасимов О.І. Гранульована матерія: складне в простому. //Вісник ОДЕКУ.-2005.-№1.- С.206-212.
24. Герасимов О.І. Гранульовані матеріали у довкіллі. //Причорноморський екологічний бюлетень. Одеса. -2007.-.№2(24) С.157-166.
25. Hansen J.-P., Mcdonald J. Theory of simple liquids. London: Academic Press, 1986. – 600 p.

Фізика гранульованих матеріалів: стан та перспективи досліджень. Частина 1.

Герасимов О.І.

Робота починає серію статей, які присвячені огляду стану досліджень у актуальному, який стрімко розвивається, напрямку сучасної фізики м'якої матерії: фізиці гранульованих матеріалів, що виявляють унікальні, проміжні по відношенню до відомих агрегатних станів: газів, рідин, аморфних та твердих тіл та є по суті складними, багаточастинковими, суттєво нелінійними, динамічними дисипативними мікромеханічними системами.

У частині першій наведені деякі типові, часто екстраординарні як структурні так і динамічні властивості, а також обговорюються окремі напрямки їх досліджень. Дискутуються проблеми та перспективи розвитку загальної теорії та методів фізичного та чисельного моделювання таких матеріалів, їх адекватність, а також намічуються теми та питання, які планується висвітлювати у наступній серії оглядів.

Ключові слова: динамічні дисипативні системи, м'яка матерія, гранульовані матеріали.

Physics of granular materials: state and perspective of investigations. Part 1.

Gerasymov O.I.

By present paper we open the set of reviews concerned the study of structure and dynamic properties of nonequilibrium, dissipative, nonlinear systems – granular materials which has a wide applications in science and industry. The focus as it is planned will be done on overview of observed specific properties (like compaction, segregation, inelastic collapse, dynamic phase transitions and some other) and their physical modeling superimposed with the numerical simulations and in some cases with the direct physical experiments. The influence of inelasticity of the intergrain collisions, as well as initial and boundary effects and relevant constitutive relations will be also outlined. The present first part of review is related to outline of most specific properties which display granular materials subjected into particular conditions.

Key words: dynamic dissipative systems, soft matter, granular material.