

УДК 532.526:538.9

Исследование распространения акустических волн и течения в нанодисперсной среде*

С.П. Бардаханов, В.И. Лысенко, В.В. Обанин, Д.Ю. Труфанов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: bard@itam.nsc.ru

Проведены исследования распространения акустических волн в нанодисперсных порошках и движения порошков под действием акустических колебаний. Исследования выполнены в горизонтальной трубе с помощью визуализации и термоанемометрического метода.

Ключевые слова: нанодисперсный порошок, течение, акустические волны.

ВВЕДЕНИЕ

Физико-химические свойства наноразмерных структур отличаются как от свойств отдельных атомов и молекул, так и от свойств массивных тел, состоящих из громадного числа атомов или молекул. Установление закономерностей объединения атомов и молекул в наноразмерные кластеры, комплексы и агрегаты и умение контролировать условия такого объединения позволят сформировать новые наноструктуры, изучить новые явления и свойства, характерные именно для нанообъектов, и на этой основе создать новые функциональные материалы и устройства.

Решение проблем в этой области исследований осложняется отсутствием надежных научных данных о свойствах движения нанодисперсных порошков. Более того, формирование научных подходов к описанию такого движения находится на начальной стадии. Например, их можно традиционно относить к гранулированным средам. Для описания последних развивается несколько конкурирующих и даже взаимоисключающих подходов. Провести их взаимное сравнение не представляется возможным, поскольку практически отсутствуют экспериментальные данные (и способы измерения) о внутренних динамических параметрах течения гранулированной среды при ее движении.

Нанодисперсные материалы, состоящие из первичных частиц размерами менее 100 нанометров, являются одной из форм существования нанообъектов. В настоящей работе, в соответствии с [1], предполагается, что нанодисперсные порошки есть новый тип сплошной среды. Во-первых, в ней размеры частиц срав-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию Министерства образования и науки РФ (проект РНП 2.1.2/541).

нимы с размерами молекул газа. Во-вторых, количество первичных частиц сравнимо с количеством молекул газа как в покое, так и в движении. В-третьих, характер взаимодействия частиц имеет важнейшее значение и зависит от вещества частиц. В-четвертых, хотя “насыпная” плотность порошков велика по сравнению с плотностью газа, все же она на порядки меньше плотности вещества в компактном состоянии.

Эта среда неньютоновская, сжимаемая, частицы в ней образуют агломераты разного уровня прочности, и т. д. Однако эти трудности можно преодолеть, если, представляя ее сплошной средой типа “легкой жидкости” или “тяжелого газа”, найти способы сопоставления внутренней структуры течения с макропараметрами. Тогда поведение нанопорошков можно будет сравнивать с ситуациями, достаточно хорошо изученными в соответствующих разделах классической (и неклассической) механики.

Авторами работы была поставлена задача получения данных о свойствах течений нанопорошков, опираясь на аналогию с механикой жидкости. Цель настоящей работы — исследование распространения акустических волн в нанодисперсных порошках и движение порошков под действием акустических колебаний.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для выполнения поставленной задачи использовались экспериментальные установки различного уровня сложности, моделирующие классические задачи механики жидкости: падение тяжелого шара под действием силы тяжести в покое, течение порошка через трубы различного диаметра под действием давления, силы тяжести, вентилятора; течение порошка во вращающемся цилиндрическом сосуде [3]; след за цилиндром в потоке порошка; поведение затопленной пульсирующей струи в окружающем порошке, а также — это является объектом исследований настоящей работы, возбуждение звука и распространение волн в нанопорошках, и другие. В качестве рабочих сред использовались различные типы промышленно выпускаемых и опытных нанодисперсных порошков оксида алюминия Al_2O_3 и диоксида кремния SiO_2 (аэросил) с удельной поверхностью до $380 \text{ м}^2/\text{г}$, средним размером первичных частиц от 7 нанометров и насыпной плотностью от 40 граммов на литр. На рис. 1 приведен пример фотографии агломерированных наночастиц аэросила А-380, полученной на просвечивающем электронном микроскопе. Видно, что первичные частицы в этом порошке действительно имеют размер порядка нескольких нанометров (в среднем $\sim 7 \text{ нм}$).

Основными средствами измерений служили видеосъемка и впервые примененный к исследованию таких сред термоанемометрический метод измерений, идея использования которого принадлежит авторам [2].

В работе [3] приведены теоретические предпосылки корректности применения термоанемометра в нанопорошках. Показано, что экспериментальные данные, полученные для течения в нанопорошке диоксида кремния и в воздухе, при малых

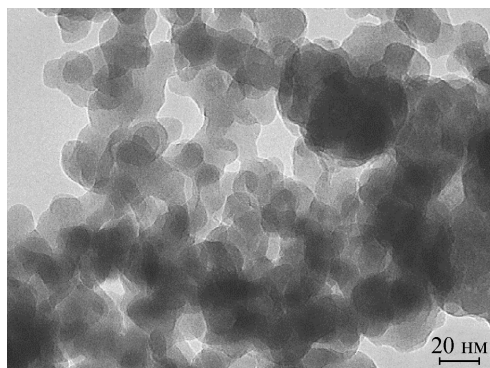


Рис. 1. Электронная микроскопия порошка аэросил-380 с удельной поверхностью $380 \text{ м}^2/\text{г}$ и средним размером первичных частиц 7 нм.

скоростях соответствуют линейным тарировочным зависимостям термоанемометра $E^2 = 3,06 + 3,08 \sqrt{u}$ (для нанопорошка) и $E^2 = 0,236 + 0,07 \sqrt{u}$ (для воздуха), где E — среднее напряжение в мосте термоанемометра, u — скорость потока. Из этих зависимостей следует, что при обтекании нагретой нити датчика (при одной и той же скорости) теплоотвод в нанопорошке более чем на порядок интенсивнее, чем в воздухе. Также отображено применение термоанемометрического способа измерений, который позволяет получать не только средние скорости, но и среднеквадратичные пульсации скорости внутри порошка.

Вязкость имеет главнейшее значение при описании свойств жидкостей и газов. Оказывается, что аналогичная характеристика может быть введена и для нанодисперсных порошков. Проведенные авторами эксперименты в длинной вертикальной трубе, заполненной различными нанодисперсными порошками, с фиксацией времени падения шариков различного диаметра, изготовленных из материалов с различной плотностью, показали, что время падения тяжелых шариков зависит от диаметра и плотности материала шарика, а также от вещества и марки порошка. Следовательно, сила сопротивления их движению различна, и введение понятия, аналогичного понятию вязкости, вполне уместно.

Если в течение нанопорошка поместить какое-нибудь тело, например, круговой цилиндр, то можно исследовать его обтекание потоком нанодисперсного порошка. Из полученных авторами данных следует, что картина такого течения во многом напоминает классическую, в частности, для ньютоновских жидкостей. Термоанемометрические измерения в этом течении показали, что, как и в классическом течении, распределение средней скорости и флуктуаций скорости в следе за цилиндром неоднородное.

Однако в такой среде могут быть существенные особенности. Примером может служить движение порошка в горизонтальной трубе. Для достижения поставленной в данной работе цели и получения данных об особенностях распространения звуковых волн в воздухе в присутствии наночастиц на границе воздух-нанопорошок, а также в самом нанопорошке была создана экспериментальная установка, в качестве которой использовалась прозрачная стеклянная труба с внутренним диаметром 45 мм и общей длиной 1 м (рис. 2). Созданная установка аналогична трубке Кундта, в которой под воздействием звука определенной частоты начинается движение пробковой пыли, в результате чего на равных расстояниях друг от друга образуются холмы пробковой пыли, соответствующие стоячим звуковым волнам.

В наших опытах на одном конце трубы устанавливался динамический громкоговоритель. В трубу засыпались различные нанопорошки. В другой ее конец вставлялся поршень, положением которого можно было регулировать длину слоя порошка во внутренней полости и высоту насыпанного слоя. Громкоговоритель возбуждался от звукового генератора на различных частотах. Соответствующие картины течения регистрировались цифровой видеочкамерой.

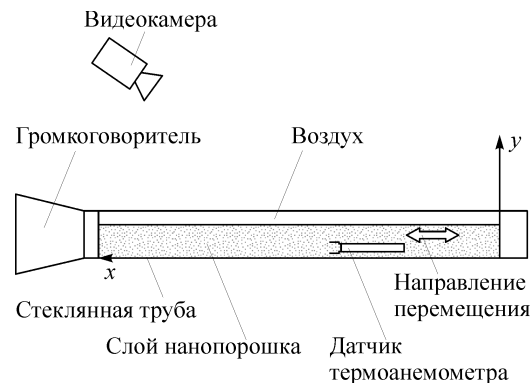


Рис. 2. Схема эксперимента по исследованию движения нанопорошков в горизонтальной трубе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Для получения распределений средних скоростей и среднеквадратичных флуктуаций скорости в воздухе и порошке применялся датчик термоанемометра, тот же, что и в [3], аналогичный датчику, использованному в [4]. Диаметр позолоченной вольфрамовой нити термоанемометра составлял 6 мкм, а длина — 1,5 мм. Устанавливался перегрев датчика 0,8 — типичный для обеспечения достаточной чувствительности при измерениях в воздухе.

Датчик тарировался в порошке в специально созданной для этого установке [3]. Основные данные получены для порошка аэросил А-380 (промышленного диоксида кремния, синтезированного по методике высокотемпературного гидролиза тетраоксида кремния с чистотой 99,8 %) с удельной поверхностью 380 м²/г и средним размером первичных частиц 7 нм, причем качественно картина этого течения совпадала с картиной течения в плазмохимическом нанопорошке оксида алюминия (с удельной поверхностью 40 м²/г).

На рис. 3 представлены фотографии структуры поверхности нанопорошка при резонансной частоте генерации звуковой волны (при такой частоте длина акустической волны равна двум длинам рабочего участка трубы, при этом картина структуры поверхности нанопорошка является стационарной, наблюдаются стоячие волны). На двух верхних фотографиях зафиксирован первоначально возникающий “туман” из нанопорошка, который со временем оседает и превращается в “тучи” (см. рис. 3, три нижние иллюстрации). На рисунке видно сильное влияние звука на границу раздела сред воздух–нанопорошок. Заметна четкая структурированность такой границы.

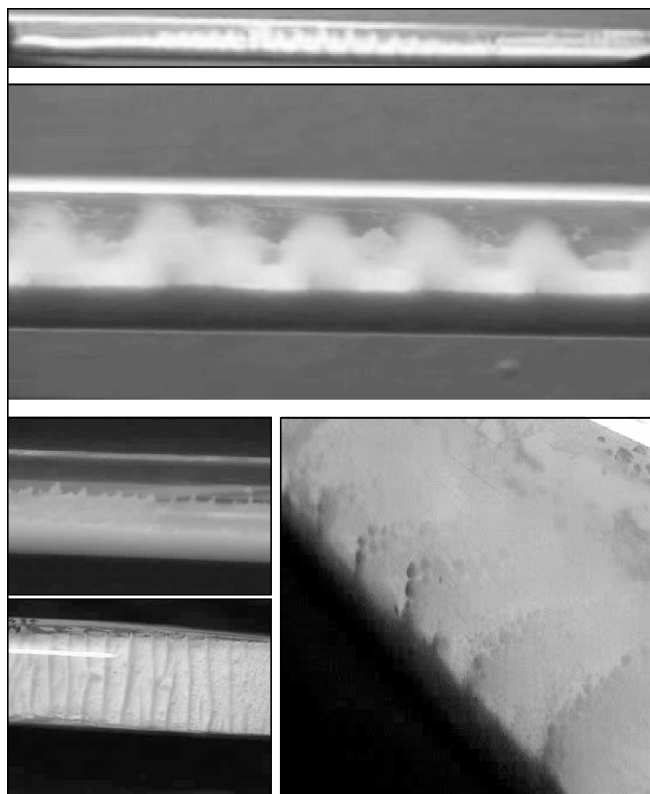


Рис. 3. Структура поверхности наноразмерного порошка при резонансной генерируемой частоте.

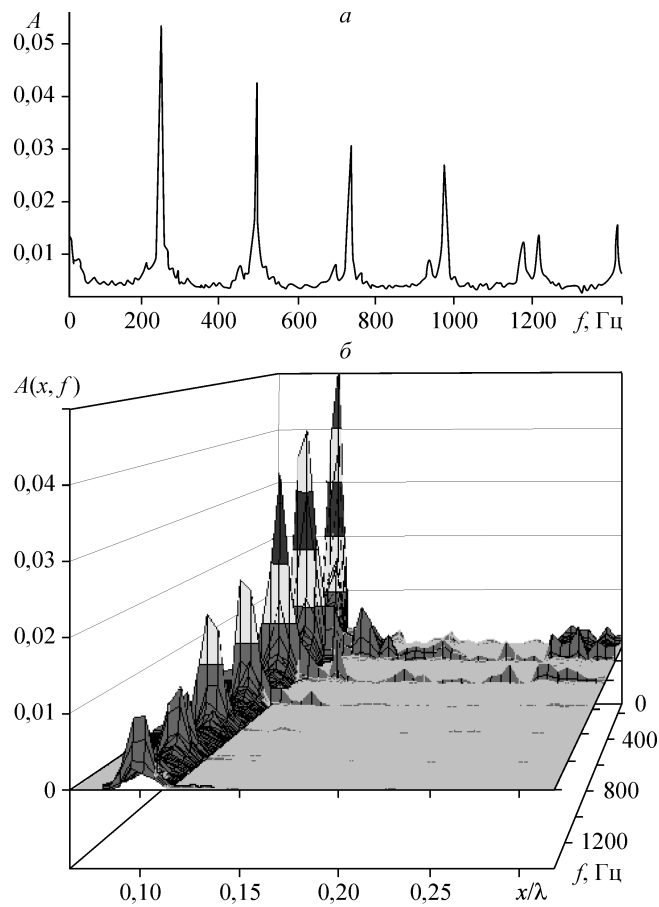


Рис. 4. Спектр сигнала термоанемометра внутри слоя нанопорошка (а) и распределение таких спектров вдоль безразмерной продольной координаты (b) при резонансной генерируемой частоте.

На рис. 4 приведены спектр сигнала термоанемометра внутри слоя нанопорошка при продольной координате, соответствующей максимуму сигнала (а), и распределение таких спектров вдоль продольной координаты (b) при резонансной генерируемой частоте: A — амплитуда, f — частота, x — продольная координата. Размерная координата x на рис. 4, b обезразмерена на длину волны λ полуволнового резонатора в трубе, равную 1,46 м.

На рис. 5 показана структура окрестности пика волны на поверхности наноразмерного порошка при одной из нерезонансных генерируемых частот, при этом



Рис. 5. Структура поверхности наноразмерного порошка при одной из нерезонансных генерируемых частот.

картина структуры поверхности нанопорошка является нестационарной, а волна — бегущей.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в пространстве воздух–поверхность порошка, как и в работе [5], наблюдаются стоячие и бегущие волны различного вида. Общая форма стоячих волн соответствует классическим решениям, однако в нашем случае волны существенно структурированы и распадаются на характерные зоны. Определенная структура наблюдается и внутри этих зон (см. пики на рис. 3, 5). Термоанемометрические измерения показывают, что волны существуют и внутри порошка, с генерацией высших гармоник (см. рис. 4). В экспериментах также обнаружено, что распределение среднеквадратичных пульсаций скорости над поверхностью порошка другое, чем в самом порошке, а расстояния (по продольной координате x) между максимумами волн внутри нанопорошка отличаются от расстояний между пиками над поверхностью. Скорее всего, это связано с различием в скорости распространения возмущений (скорости звука) в воздухе и порошке.

Скорость звука в нанопорошках определялась в этой же горизонтальной трубе (см. рис. 2), при этом труба была полностью заполнена порошком. На громкоговоритель от генератора подавался сигнал (прямоугольный импульс). В конце трубы размещался микрофон. Генерируемый звуковой сигнал и сигнал с микрофона одновременно подавались на двухлучевой осциллограф, и по разности во времени между генерируемым и пришедшим к микрофону сигналами определялась скорость звука в нанопорошке. Как показали проведенные измерения, скорость звука в нанопорошках составляла 50–70 м/с, т. е. скорости звука в воздухе и порошке отличались примерно в пять-семь раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные о течении нанодисперсной среды, которую, видимо, можно считать новым типом сплошной среды, позволяют предполагать, что в движении нанопорошков может проявляться как сходство с хорошо изученными течениями, так и отличия. Применение термоанемометра позволяет получать более глубокие данные о течении нанодисперсных сред. Например, важным с научной и практической точек зрения является изучение нестационарных характеристик, в частности, процессов распространения возмущений в таких средах. Возможно, что полученные с точки зрения предлагаемого подхода результаты могут быть полезны для верификации существующих теорий описания движения гранулированных сред.

Как уже отмечалось выше, исследуемые порошки состоят из агломератов первичных частиц. При этом размеры агломератов существенно увеличиваются со временем, например, при хранении, когда возможно воздействие влаги, содержащейся в воздухе. Однако во всех исследованных течениях обнаружено, что агломераты при движении разрушаются при взаимодействии друг с другом, особенно в условиях интенсивного турбулентного течения, причем степень их разрушения может быть очень высокой. Как показали проведенные исследования, этому может

способствовать генерации в нанопорошках (на стадии “тумана”) акустических волн. Определена скорость звука в нанопорошках, которая составила 50–70 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bardakhanov S.P.** Flow of media with high nanoparticle's concentration // Inter. Symp. Sedimentation and sediment transport. Monte Verita, Switzerland, 2-6 June 2002. Proc. Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 137–142.
2. **Бардаханов С.П., Козлов С.А.** Термоанемометрические измерения в течениях нанодисперсных порошков // Тез. докл. 8-й Международной конференции “Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей” (апрель 2001 г., Новосибирск). Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2001. С. 16–17.
3. **Обанин В.В., Труфанов Д.Ю., Номоев А.В., Бардаханов С.П.** Термоанемометрические измерения в нанопорошковых средах // Вестник НГУ. Физика. 2008. Т. 8, вып. 1. С. 23–28.
4. **Косорыгин В.С.** Лабораторный комплекс для изготовления термоанемометрических датчиков с нагреваемой нитью. Новосибирск, 1982. 20 с. (деп. в ВИНТИ 02.08.1982, № 4166-82).
5. **Ivanov E.** Sound propagation in nano-granular media // Nanotechnology in Mech. Engng. Yuengnam University / Ed. S.P. Bardakhanov. South Korea. 2002. P. 30–45.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2010 г.