

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ СЛОЯ
НАНОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА И ИХ УЧЕТ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

А. А. Попова, И. Н. Шубин

*Кафедра «Техника и технологии производства наноматериалов»,
alyona.popova.93@list.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: оборудование; поведение нанодисперсного материала; расчет технологических параметров; углеродный наноматериал.

Аннотация: Рассмотрены особенности поведения нанодисперсного слоя и отдельных наночастиц применительно к процессам подачи из бункера с наложением вибрации, его движения по направляющей лопасти и ссыпания потока в приемную емкость. Аналогия поведения потоков традиционных дисперсных материалов, например, порошков и промышленных пылей, и нанодисперсных позволили выделить основные стадии при его движении. Установлено, что коэффициент разрыхления потока при падении нанодисперсного материала прямо пропорционален высоте слоя и скорости наночастиц. Сформулированы зависимости и даны рекомендации по проектированию бункерного узла, используемого в технологическом оборудовании для обработки нанодисперсных материалов.

Введение

Сегодня нанотехнологии плавно переходят из разряда фундаментальных и теоретических исследований, лабораторных образцов в разряд опытно-промышленного и серийного производства, подразумевающего стабильное качество продукции – будь то непосредственно углеродные материалы (**УНМ**) или оборудование для их получения или обработки. При этом на первое место часто выходят не сами УНМ, а именно аппаратурно-технологическое оформление процесса производства, обеспечивающее гарантированные характеристики получаемого конструкционного или функционального наноматериала [1 – 3]. Переход к нанодисперсным материалам с характерными размерами частиц ~ 10...100 нм позволяет добиться как существенного улучшения существующих свойств, так и получение принципиально новых, что обусловлено изменением характеристик материалов при достижении нанометрового размера частиц [4 – 6].

Медицина и фармакология, производство сорбентов, полимеров и строительных материалов, порошковая металлургия – это лишь небольшой перечень областей, где востребованы знания о свойствах нанодисперсного материала (**НДМ**), состоящего из сплошной среды газа или жидкости и дисперсных наночастиц НДМ, и особенностях технологического оборудования при их применении, с учетом масштабирования и реальных условий производства [1, 6, 7].

Исследованию характеристик НДМ посвящено большое количество работ, авторы которых отмечают полную аналогию его свойств с дисперсными сыпучими материалами, в том числе порошками и промышленными пылями [5, 8 – 12]. Так, например, в работе [13] рассмотрено влияние электростатических свойств НДМ на процесс переработки, общие физико-механические характеристики отдельных наночастиц, законы их движения рассмотрены в работе [14]. Во всех работах рассматриваются лишь отдельные характеристики НДМ применительно к лабораторным исследованиям и не учитываются все их параметры, а также условия использования и расчета оборудования, то есть отсутствуют работы, посвященные практическому использованию [15 – 17].

Цель работы – попытка применить классические подходы к расчетам и конструированию технологического оборудования для наноиндустрии, как наиболее динамично развивающейся области инновационных материалов и технологий.

Моделирование поведения НДМ при расчете типового оборудования

Рассмотрим конструкцию устройства узла подачи нанодисперсной системы, состоящую из бункера, виброднища и наклонной лопасти, и проведем оптимизационный синтез, состоящий в сочетании отдельных узлов, каждый из которых обеспечивает определенное состояние слоя наночастиц. В качестве допущений приняты следующие этапы состояния НДМ: в бункере – неподвижный слой (наночастицы в постоянном контакте друг с другом); на виброднище – наночастицы в виброоживленном слое (хаотическое перемещение наночастиц); на наклонной лопасти – в скатывающемся слое (упорядоченное слоистое движение); отрыв от края лопасти и падение наночастиц в веере – свободное одночастичное движение (до завала). Этапы движения НДМ подробнее рассмотрим на примере одного бункерного устройства (рис. 1).

На первом этапе подачи НДМ 1 происходит его истечение из бункера 2 на направляющую лопасть 4 по виброднищу 3 . В данном случае виброднище 4 применяется для выравнивания скорости истечения и разрушения сводообразования. Представим виброднище как пластину (рис. 2), совершающую колебания с частотой ω и амплитудой A в направлении, образующем угол β с вертикальной осью [5, 18]. На наночастицу массой m действуют сила тяжести $P = mg$, сила трения о поверхность пластины $F_{\text{тр}}$, нормальная реакция поверхности N , а также сила инерции I . Если НДМ поступает на виброднище, но не отрывается от него, то его ускорение относительно данной поверхности $\ddot{y} = 0$. Исследования [18 – 21] показали, что свойства слоя нанодисперсной системы при вибрационном воздействии существенно изменяются с началом отрыва наночастиц друг от друга

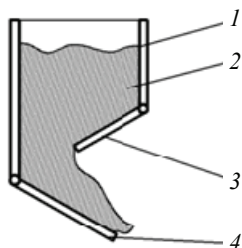


Рис. 1. Схема движения НДМ при истечении из бункерного устройства:
1 – НДМ; 2 – бункер; 3 – виброднище;
4 – направляющая лопасть

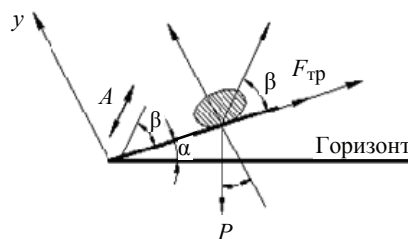


Рис. 2. Схема действия сил на наночастицу при наложении вибрации

и от вибрирующей поверхности, на которой они находятся. До начала отрыва НДМ ожижается на вибрирующей поверхности. После наступления отрыва – при увеличении интенсивности колебаний – начинается произвольное перемещение НДМ, слой как бы «вскипает», то есть увеличивается его порозность. Наночастицы материала отрываются от виброднища, когда нормальная реакция $N = 0$. Тогда, согласно последнему уравнению, получим

$$A_{кр} \omega_{кр}^2 = \frac{g \cos \alpha}{\sin(\omega \tau) \sin \beta}, \quad (1)$$

где $A_{кр}$ – критическая амплитуда, м; $\omega_{кр}$ – циклическая частота, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Из выражения (1) видно, что минимальное критическое ускорение вибрации виброднища, при котором произойдет отрыв наночастицы, будет при $\sin(\omega \tau) = \pm 1$. В эти моменты относительное критическое ускорение вибрации определяется по формуле

$$\frac{A_{кр} \omega_{кр}^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} = \pm 1. \quad (2)$$

Для нанодисперсной системы, подвергаемой вибрационному воздействию, переход слоя материала к виброожижению зависит не от массы наночастиц, а от ускорения вибрации $A\omega$ виброднища. Это дает возможность, регулируя амплитуду и частоту вибратора, управлять виброожижением и соответственно порозностью в пограничном слое материала.

Таким образом, принимая во внимание действие массы НДМ, неучтенное при рассмотрении движения наночастицы по виброднищу, необходимо ввести ряд граничных условий (допущений):

- 1) НДМ не отрывается от вибрирующей поверхности (при соблюдении условия $N > 0$);
- 2) ожигение пограничного слоя наночастиц управляемо;
- 3) происходит разрушение сводообразования в объеме потока;
- 4) порозность в объеме НДМ остается постоянной, так как ее увеличение (ожигение наночастиц в пограничном слое вдоль виброднища) компенсируется уплотнением лежащего выше слоя за счет вибрации.

Определение скорости истечения материала из бункера

Из рассмотренного выше видно, что вибрация будет влиять на расход косвенно, то есть она будет лишь «выравнивать» скорость истечения, делая расход стабильным. Тогда

$$v = \lambda \sqrt{3,2gR}, \quad (3)$$

где R – гидравлический радиус отверстия (щели) истечения, $R = F_{тр}/L$, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент истечения; L – периметр отверстия, м.

Можно утверждать, что определяющими при смешивании будут стадии со второй по четвертую, так как на первой стадии материал, вытекающий из бункера на направляющую, не влияет прямо на приготовление смеси.

Определение характеристик потока сыпучего материала при движении по направляющей пластине

На втором этапе движения НДМ поступает с виброднища на направляющую лопасть. Уравнение равновесия для НДМ, движущегося под углом α к горизонту, имеет вид

$$\ddot{x}m + F_{\text{тр}}mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = 0, \quad (4)$$

где \ddot{x} – ускорение движения наночастицы.

Откуда

$$\ddot{x} = F_{\text{тр}}mg \cos \alpha - mg \sin \alpha. \quad (5)$$

Последовательно интегрируя уравнение (5), получаем выражение для определения скорости движения НДМ и пройденного им пути

$$\dot{x} = (g \sin \alpha - F_{\text{тр}} \cos \alpha) \tau + c_1 \quad (6)$$

при граничных условиях

$$\dot{x} = v_0, \tau = 0, \Rightarrow c_1 = v_0; , \quad (7)$$

$$\dot{x} = v_0 + g(\sin \alpha - f \cos \alpha) \tau. \quad (8)$$

Далее запишем уравнение пройденного пути по направляющей лопасти, проинтегрировав уравнение (8), $x = v_0\tau + \frac{1}{2}g(\sin \alpha - f \cos \alpha)\tau^2 + c_2$.

При постоянной интегрирования при начальных условиях $c_2 = 0$; $\tau = 0$; $x = 0$ уравнение примет вид

$$x = v_0\tau + \frac{1}{2}g(\sin \alpha - f \cos \alpha)\tau^2. \quad (9)$$

Определение коэффициента разрыхления в движущемся слое материала

Нанодисперсный материал, находясь в скатывающемся слое на направляющей лопасти, увеличивает порозность. Степень разрыхления можно охарактеризовать коэффициентом разрыхления K . Коэффициент расширения является важной переменной, характеризующей отношение элементарных объемов НДМ в бункере и в потоке, движущемся вдоль направляющей лопасти. Для получения данной величины необходимо определить среднюю скорость потока $\dot{x}_{\text{ср}}$

$$\dot{x}_{\text{ср}} = \frac{\int_0^L \dot{x} \partial Q}{\sum_0^L Q}, \quad (10)$$

где \dot{x} – функция скорости наночастиц потока в зависимости от пройденного пути; ∂Q – количество материала на направляющей лопасти.

Анализируя зависимость (10) для средней скорости и упростив его, запишем

$$\dot{x}_{\text{ср}} = v'_{\text{ср}} = \frac{L_{i\text{ср}}}{\tau_{i\text{ср}}}, \quad (11)$$

где $L_{i\text{ср}}$ – средний путь, пройденный i -й наночастицей вдоль лопасти, м; $\tau_{i\text{ср}}$ – среднее время затраченное i -й наночастицей на прохождение пути, с.

Коэффициент разрыхления потока НДС, движущегося по лопасти, находим по уравнению

$$K = \frac{v'_{cp} h_L}{S_\tau}, \quad (12)$$

где h_L – толщина потока на краю ссыпания с лопасти, м; S_τ – площадь нанодисперсного слоя (НДС), выходящая на линию ссыпания, за время прохождения наночастицами длины, м².

Теоретическое исследование движения нанодисперсного материала

На третьей стадии движения материала – свободном падении с направляющей – необходимо рассмотреть ряд моментов. Для определения общих закономерностей движения рассмотрим качественную картину движения материала. В работах [20, 21] доказано, что траектория падения частицы зависит от ее скорости в момент отрыва от направляющей и имеет параболический вид. Анализ результатов экспериментов позволяет сделать предположение о том, что в процессе падения с направляющей частицы материала практически не соударяются друг с другом. Вследствие того, что скорость частиц материала в момент отрыва от направляющей определяется их положением на ней, естественно предположить, что и траектория падения отдельных частиц определяется тем же. При падении с направляющей сыпучий материал разрыхляется. Доказательством этого является тот факт, что ширина веера ссыпавшегося с направляющей материала увеличивается, по мере удаления от ссыпавшегося края, в то же время количественный расход материала через любое горизонтальное сечение в веере остается постоянным.

На третьем этапе движения НДМ наступает свободное падение с направляющей лопасти. Для анализа этого движения необходимо ввести допущения, подтвержденные в ряде работ [20 – 22]:

1. Наночастицы ссыпаются с направляющей потоком, состоящим из ряда подслоев, толщина которых определяется средним размером наночастиц.
2. В момент отрыва от направляющей наночастицы, находящиеся в одном подслое, имеют одинаковые скорости.
3. Скорость наночастицы в момент отрыва увеличивается по толщине потока, по мере удаления от ссыпавшегося края направляющей лопасти.

Границы веера НДМ, ссыпавшегося с направляющей плоскости

Движение наночастицы в свободном падении после отрыва от направляющей лопасти можно рассматривать как движение тела в гравитационном поле с некоторой начальной скоростью. Уравнение траектории движения i -й наночастицы определяется по формулам:

$$x = -h_i \sin \alpha - v_i \tau \cos \alpha; \quad (13)$$

$$y = h_i \cos \alpha - v_i \tau \sin \alpha - \frac{g\tau^2}{2}, \quad (14)$$

где x, y – текущие координаты движущейся наночастицы; h_i – расстояние между наночастицей и ссыпавшим краем направляющей лопасти при отрыве, в направлении, нормальном вектору скорости частиц, м; α – угол между вектором скорости v_i и горизонталью; τ – текущее время с момента отрыва частицы от направляющей лопасти, с.

Как отмечалось ранее, нанодисперсный слой, движущийся по направляющей лопасти, имеет сечение слоя, близкое к прямоугольному. Для частицы, находящейся на нижней границе слоя, $h_i = 0$ и $v_i = v_n$. Нижняя граница веера падения наночастиц описывается уравнениями:

$$x = v_n \tau \cos \alpha ; \quad (15)$$

$$y = v_n \tau \sin \alpha + \frac{g\tau^2}{2} . \quad (16)$$

Для частицы, движущейся по верхней границе слоя, $h_i = h$ и $v_i = v_b$. Верхняя граница веера представлена уравнениями:

$$x = -h_i \sin \alpha - v_b \tau \cos \alpha ; \quad (17)$$

$$y = h_i \cos \alpha - v_i \tau \sin \alpha - \frac{g\tau^2}{2} . \quad (18)$$

Длины верхней границы веера от ссыпающего края направляющей лопасти до открытой поверхности завала L_b и нижней L_n могут быть найдены по уравнениям (15) – (18) через криволинейные интегралы вида

$$L_{b,n} = \int_L f(x; y) dL . \quad (19)$$

Время падения потока наночастиц с направляющей плоскости

Время падения наночастиц с направляющей лопасти τ_n определяется с момента отрыва их от направляющей лопасти до момента соприкосновения с открытой поверхностью завала. Для определения численного значения τ_n необходимо совместить решения уравнений траектории падения наночастиц (13), (14) и уравнения открытой поверхности завала.

Открытая поверхность завала имеет сложную форму и до настоящего времени нет зависимостей, описывающих эту границу. Как показали сравнения экспериментальных и расчетных значений, при определении времени падения наночастиц с направляющей, уравнение открытой поверхности завала имеет вид

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_n , \quad (20)$$

где α_n – угол между открытой поверхностью «завала» и горизонталью, °.

Решив совместно уравнения (13), (14) и (20), получим зависимости для определения координат точки пересечения траектории падающей наночастицы с открытой поверхностью завала и времени падения наночастицы:

$$M = \frac{1}{g} (v_i \cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha - v_i \sin \alpha) ; \quad (21)$$

$$N = \frac{2}{g} (h_i \cos \alpha - h_i \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha) .$$

Подставив в выражение (21) значения v_i и h_i для наночастиц, движущихся по верхней или нижней границе потока, найдем верхний предел интегрирования для интеграла (19). Нижний предел для конкретного случая равен 0.

Скорость падения потока наночастиц с направляющей плоскости

Для определения скорости падения частиц, при падении их с направляющей лопасти, необходимо про дифференцировать уравнения (13) и (14) по времени:

$$v_r = v \cos \alpha ; v_b = v \sin \alpha + gt, \quad (22)$$

где v_r , v_b – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости движения наночастицы.

Для определения скорости движения наночастицы при прохождении ее горизонтального сечения $I - I$ (рис. 3), необходимо в уравнении (15) подставить значение $y = H$, найти значение t и по уравнениям (22) определить значение v_r и v_b .

Ранее отмечалось, что при падении с направляющей лопасти поток НДМ разрыхляется. По аналогии с коэффициентом разрыхления в скатывающемся слое, коэффициент разрыхления потока наночастиц K можно представить в виде отношения объема V_g количества НДМ Q , в движении, к объему V_n , занимаемому таким же количеством НДМ, движущегося по направляющей лопасти.

Для выяснения причин возникновения разрыхления падающего потока НДМ рассмотрим разрыхление потока в горизонтальном и вертикальном направлениях. При определении коэффициента разрыхления в горизонтальном направлении K_r , необходимо рассмотреть падение наночастиц 1 и 2 , которые на направляющей находятся в различных скоростных подслоях.

Расстояние L_2 между центрами тяжести наночастиц в горизонтальном направлении определим по выражению

$$L_2 = \frac{v_2^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} + v_2 \sqrt{\frac{v_2^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2h \cos \alpha}{g}}, \quad (23)$$

где v_1 , v_2 – скорости наночастиц в момент отрыва их от направляющей лопасти, м/с; α – угол между векторами скоростей и горизонталью; h – расстояние между центром тяжести наночастицы 2 и краем направляющей лопасти, в направлении нормальном к векторам скорости движения наночастиц, м.

Расстояние L_1 между точками пересечения траекторий падения наночастиц с горизонтальным сечением $I - I$ можно определить из выражения

$$L_1 = \frac{v_2^2 \sin \alpha}{g} + v_2 \sqrt{\frac{v_2^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2(h \cos \alpha + H)}{g}} + \frac{v_1^2 \sin \alpha}{g} - v_1 \sqrt{\frac{v_1^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2H}{g}}. \quad (24)$$

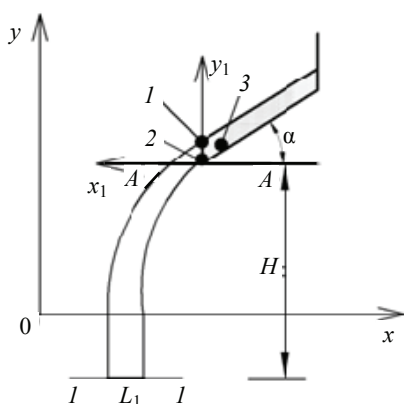


Рис. 3. Схема к определению коэффициента разрыхления материала НДС в веере

Для определения коэффициента разрыхления в веере K_v необходимо рассмотреть падение наночастиц 2 и 3, которые отрываются от направляющей одна за другой из одного и того же подслоя. В момент отрыва от лопасти наночастицы имеют одинаковые скорости, но наночастица 3 отрывается позже наночастицы 2. Время запаздывания τ_{32} можно определить из выражения

$$\tau_{32} = \frac{L_{32}}{v_3}, \quad (25)$$

где L_{32} – расстояние между центрами тяжести наночастиц в направлении их движения в момент отрыва наночастицы 2.

Расстояние между центрами тяжести в горизонтальном направлении, за некоторое время τ с момента отрыва наночастицы 3 от направляющей лопасти, определим по уравнению

$$L_\tau = v_2 \tau_{32} + \frac{g \tau_{32}^2}{2} + g \tau \tau_{32}, \quad (26)$$

из которого следует, что разрыхление НДМ в веере меняется по ширине и высоте. Однако при проведении практических расчетов удобнее пользоваться объемным коэффициентом разрыхления

$$K = \frac{V_d}{V_n}, \quad (27)$$

где V_d , V_n – объемы, занимаемые некоторым количеством движущегося материала и таким же его количеством в покое соответственно. Принимая, что

$$V_n = L \int_S dS; \quad V_d = L_1 L v_{в.ср} \tau,$$

где L_1 – ширина веера в сечении $I - I$; $v_{в.ср}$ – вертикальная составляющая средней скорости движения материала при прохождении им сечения $I - I$, выражение (27) примет вид

$$K = \frac{L_1 v_{в.ср} \tau}{\int_S dS}. \quad (28)$$

Выводы

Анализ литературных источников и экспериментальные исследования поведения НДМ позволили выделить основные стадии при его движении из бункера: сначала вдоль виброднища, затем по направляющей лопасти и следующая – при падении в веере, и подтвердили возможность проникновения материалов из потока в поток [5, 20 – 22]. Анализируя движение НДМ на направляющей и при падении в веере потока, сделаны ряд выводов и допущений о свойствах движущегося слоя материала:

– скорость частиц v по высоте H веера потока материала возрастает, то есть $v = f(H)$;

– коэффициент разрыхления потока частиц K при падении материала прямо пропорционален высоте H и скорости v частиц $K = f(H, v)$;

– на скорость разгона потока на направляющей (а косвенно и на продолжительность процесса смешивания в целом) оказывает влияние, помимо физико-механических свойств сыпучих материалов, также угол ее наклона α (при увеличении угла α скорость потока возрастет);

– ширина раскрытия веера потока материала L меняется лишь до некоторой высоты H (до полного раскрытия веера), а затем остается практически постоянной, причем $L = f(v, Q, H, \alpha)$;

– на производительность установки (и время процесса) влияют площадь зазора S и угол наклона направляющей α , а влияние физико-механических свойств сыпучих материалов снижается из-за наличия вибратора.

Таким образом, впервые при анализе поведения нанодисперсного материала для расчета промышленного технологического оборудования использован традиционный подход. Рассмотрены особенности поведения нанодисперсного слоя и отдельных наночастиц применительно к элементам технологического оборудования. Сформулированы зависимости и даны рекомендации по проектированию бункерного узла, используемого для функционализации нанодисперсных материалов. Предложен общий подход к расчету и проектированию оборудования для подачи нанодисперсных материалов. Установлены особенности поведения нанодисперсного слоя на каждом этапе при подаче НДМ из бункера на его последующую обработку.

Список литературы

1. Ткачев, А. Г. Промышленные технологии и инновации. Оборудование для nanoиндустрии и технология его изготовления : учеб. пособие / А. Г.Ткачев, И. Н. Шубин, А. И. Попов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 132 с.
2. Таров, Д. В. Аппаратурное оформление функционализации углеродных нанотрубок стеаратом титана / Д. В. Таров, Т. В. Гурова, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 360 – 366. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.360-366
3. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
4. Шубин, И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства : учеб. пособие / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2005. – 76 с.
5. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
7. Диагностика физико-механических характеристик наноматериалов : учеб. пособие : в 2-х ч. / А. Г. Ткачев, И. Н. Шубин, А. А. Пасько [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – Ч. 1. – 96 с.
8. Определение размера частиц углеродных наноструктурированных материалов, полученных пиролизом пропан-бутановой смеси на металлическом катализаторе / А. И. Букатин, Ю. А. Феррапонтов, М. А. Ульянова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 1А. – С. 85 – 94.
9. Определение углов и коэффициентов трения углеродных наноматериалов / В. Ф. Першин, Т. Х. К. Алсайяд, Т. В. Пасько, А. А. Пасько // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 184 – 188.
10. Андрианов, Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов / Е. И. Андрианов. – М. : Химия, 1982. – 256 с.

11. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – 2-е изд., испр. – Л. : Химия. Ленингр. отделение, 1987. – 262 с.
12. Свиридов, М. М. Текучесть сыпучего материала / М. М. Свиридов, В. П. Таров, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5, № 4. – С. 553 – 559.
13. Ćitaković, N. Physical Properties of Nanomaterials / N. Ćitaković // Military Technical Courier. – 2019. – Vol. 67, Issue 1. – P. 159 – 171. doi: 10.5937/vojtehg67-18251
14. Mechanical Test Method and Properties of a Carbon Nanomaterial with a High Aspect Ratio / S. K. Jeon, H. S. Jang, O. H. Kwon, S. H. Nahm // Nano Convergence. – 2016. – Vol. 3, No. 29. – 10 p.
15. Roessler, T. Scaling of the Angle of Repose Test and its Influence on the Calibration of DEM Parameters using Upscaled Particles / T. Roessler, A. Katterfeld // Powder Technology. – 2018. – No. 330. – P. 58 – 66.
16. Guo, D. Mechanical Properties of Nanoparticles: Basics and Applications / D. Guo, G. Xie, J. Luo // Journal of Physics D Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, No. 1. – 013001 (25 pp.). doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
17. Filippov, A. A. Determination of the Mechanical Characteristics of Nanomaterials under Tension and Compression / A. A. Filippov, V. M. Fomin // Актуальные проблемы механики сплошной среды : материалы науч. тр. V Междунар. конф., 02 – 07 октября 2017 г., Цахкадзор, Армения. – Армения, 2017. – С. 164–165.
18. Варсанюфьев, В. Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Варсанюфьев, Э. Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
19. Борщев, В. Я. Экспериментальное и аналитическое исследование быстрого гравитационного течения зернистой среды / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, П. А. Иванов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 436 – 443.
20. Шубин, И. Н. Разработка конструкций и методики расчета гравитационных смесителей для сыпучих материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Шубин Игорь Николаевич. – Тамбов, 2002. – 158 с.
21. Свиридов, В. М. Перемещения компонентов в процессе смешивания сыпучих материалов / М. М. Свиридов, В. М. Червяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 450 – 454.
22. Пономарев, Д. А. Моделирование процессов смешивания сыпучих материалов в статических поворотных смесителях : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.13.01 / Пономарев Денис Андреевич. – Иваново, 2006. – 155 с.

Features of Behavior of Moving Layer of Nanodispersion Material and their Accounting when Designing Technological Equipment

A. A. Popova, I. N. Shubin

*Department of Equipment and Production Technology of Nanomaterials,
alyona.popova.93@list.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: equipment; nanodispersed material behavior; calculation of technological parameters; carbon nanomaterial.

Abstract: The paper considers the features of the behavior of a nanodispersed layer and individual nanoparticles with regard to the processes of feeding from the hopper with the imposition of vibration, its movement along the guide vane and pouring flow in the receiving tank. An analogy of the behavior of flows of traditional dispersed materials, such as powders and industrial dusts, and nanodispersed ones, made it possible to distinguish the main stages during its motion. It has been established that the coefficient of flow loosening during the fall of nanodispersed material is directly proportional to the layer height and nanoparticle velocity. Dependencies are formulated and recommendations are given for designing a bunker assembly used in technological equipment for processing nanodispersed materials.

References

1. Tkachev A.G., Shubin I.N., Popov A.I. *Promyshlennyye tekhnologii i innovatsii. Oborudovaniye dlya na-noindustrii i tekhnologiya yego izgotovleniya: uchebnoye posobiye* [Industrial technology and innovation. Equipment for the nanotechnology industry and its manufacturing technology: a training manual], Tambov: Izdatel'stvo GOU VPO TGTU, 2010, 132 p. (In Russ.)
2. Tarov D.V., Gurova T.V., Shubin I.N. [Hardware design of the functionalization of carbon nanotubes with titanium stearate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 360-366, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.360-366 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P., Orlova N.V., Shubin I.N., Tarov V.P. [Technique for designing hardware design for the production of carbon nanotubes and intermediates based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101, doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Shubin I.N., Sviridov M.M., Tarov V.P. *Tekhnologicheskkiye mashiny i oborudovaniye. Sypuchiye materialy i ikh svoystva: uchebnoye posobiye* [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties: a training manual], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2005, 76 p. (In Russ.)
5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
6. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Century. Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
7. Tkachev A.G., Shubin I.N., Pas'ko A.A., Pas'ko T.V., Memetov N.R., Baranov A.A. *Diagnostika fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik nanomaterialov: uchebnoye posobiye: v 2-kh ch.* [Diagnostics of the physico-mechanical characteristics of nanomaterials: a training manual: in 2 hours], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2014, part 1, 96 p. (In Russ.)
8. Bukatin A.I., Ferapontov Yu.A., Ul'yanova M.A., Shubin I.N., Tkachev A.G. [Determination of the particle size of carbon nanostructured materials obtained by pyrolysis of a propane-butane mixture on a metal catalyst], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 1A, pp. 85-94. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pershin V.F., Alsayyad T Kh.K., Pas'ko T.V., Pas'ko A.A. [Determination of angles and friction coefficients of carbon nanomaterials], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2018, no. 4, pp. 184-188. (In Russ.)
10. Andrianov Ye.I. *Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov* [Methods for determining the structural and mechanical characteristics of powdered materials], Moscow: Khimiya, 1982, 256 p. (In Russ.)

11. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and ground materials], Leningrad: Khimiya. Leningr. otdeleniye, 1987, 262 p. (In Russ.)
 12. Sviridov M.M., Tarov V.P., Shubin I.N. [The fluidity of bulk material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 553-559. (In Russ., abstract in Eng.)
 13. Čitaković N. Physical Properties of Nanomaterials, *Military Technical Courier*, 2019, vol. 67, issue 1, pp. 159-171, doi: 10.5937/vojtehg 67-18251
 14. Jeon S.K., Jang H.S., Kwon O.H., Nahm S.H. Mechanical Test Method and Properties of a Carbon Nanomaterial with a High Aspect Ratio, *Nano Convergence*, 2016, vol. 3, no. 29, 10 p.
 15. Roessler T., Katterfeld A. Scaling of the Angle of Repose Test and its Influence on the Calibration of DEM Parameters using Upscaled Particles, *Powder Technology*, 2018, no. 330, pp. 58-66.
 16. Guo D., Xie G., Luo J. Mechanical Properties of Nanoparticles: Basics and Applications, *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, vol. 47, no. 1, 013001 (25 pp.), doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
 17. Filippov A.A., Fomin V.M. *Aktual'nyye problemy mekhaniki sploshnoy sredy* [Actual problems of continuum mechanics], Proceedings of the V International Conference 02 - 07 October, 2017, Tsakhkadzor, Armeniya, 2017, pp. 164-165.
 18. Varsanof'yev V.D., Kol'man-Ivanov E.E. *Vibratsionnaya tekhnika v khimicheskoy promyshlennosti* [Vibration technology in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1985, 240 p. (In Russ.)
 19. Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. [Experimental and analytical study of the fast gravitational flow of a granular medium], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 436-443. (In Russ., abstract in Eng.)
 20. Shubin I.N. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2002, 158 p. (In Russ.)
 21. Sviridov V.M., Chervyakov V.M. [Displacement of components in the process of mixing bulk materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 450-454. (In Russ., abstract in Eng.)
 22. Ponomarev D.A. *PhD Dissertation (Technical)*, Ivanovo, 2006, 155 p. (In Russ.)
-

Besonderheiten des Verhaltens der sich bewegenden Schicht von nanodispersen Materialien und deren Berücksichtigung bei der Projektierung der technologischen Ausrüstung

Zusammenfassung: Es sind die Merkmale des Verhaltens einer nanodispersen Schicht und einzelner Nanopartikel in Bezug auf die Prozesse der Zuführung aus dem Trichter mit Vibrationen, ihrer Bewegung entlang der Führungsschaufel und des Gießflusses in den aufnehmenden Tank betrachtet. Die Analogie des Verhaltens von Strömungen traditioneller dispergierter Materialien, beispielsweise Pulver und Industriestäube sowie nanodisperser Stoffe ermöglichte es, die Hauptstufen während ihrer Bewegung zu unterscheiden. Es ist festgestellt, dass der Fließkoeffizient, der sich beim Fallen von nanodispersen Material löst, direkt proportional zur Schichthöhe und zur Geschwindigkeit der Nanopartikel ist. Es sind Abhängigkeiten formuliert und Empfehlungen für den Entwurf einer Bunkerbaugruppe gegeben, die in technologischen Geräten zur Verarbeitung nanodisperser Materialien verwendet wird.

Particularités du comportement de la couche mobile du matériau nanodispersé et leur prise en compte dans la conception de l'équipement technologique

Résumé: Sont examinées les particularités du comportement de la couche nanodispersée et des nanoparticules particulières applicables aux processus d'alimentation à partir de la trémie avec des vibrations, un mouvement le long de la lame de guidage et un écoulement en vrac dans le réceptacle. L'analogie du comportement des flux des matériaux dispersés traditionnels, tels que les poudres et les poussières industrielles et nanodispersés a permis de mettre en évidence les principales étapes de son mouvement. Est établi que le coefficient de relâchement du flux lors de la chute du matériau nanodispersé est directement proportionnel à la hauteur de la couche et à la vitesse des nanoparticules. Sont formulées les dépendances et sont données des recommandations pour la conception de l'unité de trémie utilisée dans les équipements technologiques pour le traitement des matériaux nanodispersés.

Авторы: *Попова Алёна Алексеевна* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ДЛЯ ЗАМЕТОК