

УДК 656.614.3:66.099.2:518

Е.А. Исаев, В.Е. Леонов, Д.А. Наговский, А.В. Букетов

Херсонская государственная морская академия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАНУЛООБРАЗОВАНИЯ УВЛАЖНЁННОГО ПЫЛЕОБРАЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

В статье изложены проблемы безопасной транспортировки гранулированного материала, в частности, ингибирования, самонагревания и самовозгорания.

На основании теоретических и прикладных исследований разработана математическая модель гранулообразования увлажнённого пылеобразующего материала. Расчётным путём определены оптимальные условия гранулообразования, что обеспечивает безопасную транспортировку гранулированного материала и охрану труда экипажа.

Ключевые слова: *гранулирование, математическая модель, пылеобразующий материал, охрана труда, самонагревание, самовозгорание.*

Постановка задачи. В условиях морской транспортировки горючих материалов в твердом состоянии возможно самонагревание, самовозгорание, взрыв твёрдых материалов. Это неизбежно приводит к проявлению опасных и вредных факторов, оказывающих негативное влияние на охрану труда экипажа [1], безопасность жизнедеятельности, пожарную безопасность, живучесть судна, сохранение мореходных качеств судна, сохранность груза и материальных ценностей.

Целью статьи является разработка математической модели гранулообразования увлажнённого пылеобразующего материала с получением прочных стабильных гранул, пригодных к безопасной транспортировке морским путём.

Эффективное гранулообразование сыпучих пылевидных материалов возможно только при определенном (оптимальном) увлажнении последних, которое, в свою очередь, определяется гранулометрическим составом, степенью развитой поверхности, содержанием илистой фракции и условиями взаимодействия смачивающей жидкости с материалом. При этом в последнем растворяются коллоидные вещества, извлекаемые из поверхностного слоя частиц.

Согласно известным представлениям начало сдвига в сыпучем материале соответствует равенству внешней сдвигающей нагрузки F_t и предельного напряжения сдвига τ .

Внутреннее сопротивление сдвигу определяется характеристиками связанной жидкости, условиями перетекания ее в межчастичном пространстве, трением, возникающим в точках контактов между частицами при их взаимном перемещении, и силами сцепления, которые необходимо преодолевать для нарушения этих контактов. Кроме того, при сдвиге преодолевается механическое зацепление, характерное для частиц, имеющих шероховатую поверхность, при этом зацепившиеся частицы изменяют свое положение до момента выхода из зацепления.

Теоретическое решение проблемы. На сдвиг материала оказывают влияние такие его параметры как плотность, внутреннее трение, структурное сцепление и влажность.

При решении задачи капиллярного взаимодействия нами рассмотрена трехфазная система: две частицы сферической формы радиусами R_1 и R_2 соответственно, прослойка жидкостной кольцевой манжеты и воздух.

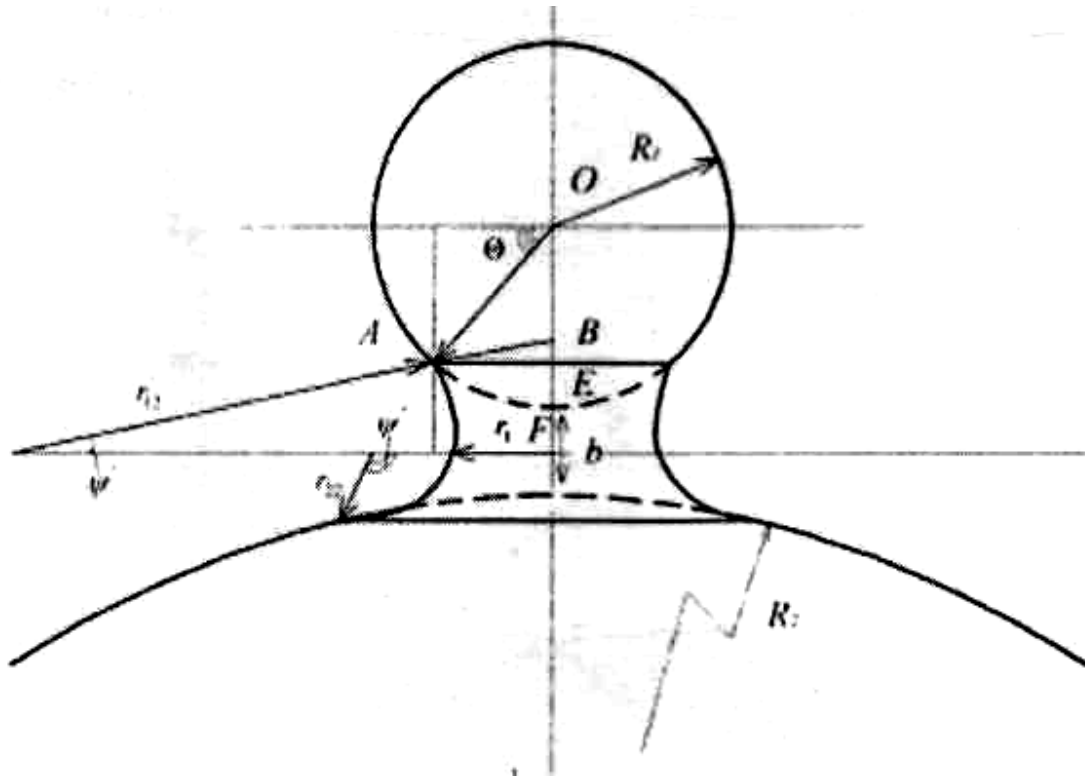
С учетом равновесия трехфазной системы:

$$\iint p(x, y) d\omega_n = F_{cн} \quad (1)$$

где $p(x, y)$ — давление на элементарную площадку;

ω_n — поверхность жидкостной манжеты.

$F_{cн}$ — сила сцепления между частицами, являющаяся суммой двух компонентов: силы, действующей благодаря двойной кривизне F_1 силы, которая обусловлена периметром смачивания частицы F_2 . Сумма этих сил может быть представлена как сила, стягивающая частицы, направление которой перпендикулярно плоскости периметра смачивания (рис. 1).

Рис. 1. Схема взаимодействия частиц радиусами R_1 и R_2 , соответственно

В результате выполненного авторами математического исследования получено выражение для определения силы сцепления между двумя сферическими частицами различного радиуса:

$$F_{\text{сц}} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \left[r_1 \cdot (C + E) + r_{12}^{\ominus} \cdot (C \cdot (1 - \cos \psi') - \arcsin C) + r_{22}^{\ominus} \cdot (E \cdot (1 - \cos \psi'') - \arcsin E) + \right. \\ \left. + R \cdot \cos(\Theta_1 + \arcsin C) \cdot \cos \psi' + R_2 \cdot \cos(\Theta_2 + \arcsin E) \cdot \cos \psi'' \right], \quad (2)$$

где $C = \sin \psi^{\ominus}$; $E = \sin \psi^{\ominus\ominus}$;

$$r_{12} = \frac{R_1 [1 - \sin(\Theta_1 + \psi')] + b/2}{\sin \psi'};$$

$$r_{22} = \frac{R_1 [1 - \sin(\Theta_2 + \psi'')] + b/2}{\sin \psi''}.$$

Обозначения остальных величин, входящих в уравнение (2), приведены на рисунке 1.

При рассмотрении частного случая, когда $R_1 = R_2 = R$, то есть, водной манжетой объединяются частицы одинаковых размеров, сила сцепления равна:

$$F_{\text{сц}} = 4 \cdot \pi \cdot \sigma_{\text{жг}} \cdot \left[r_1 \cdot a + R(1 - \sqrt{1 - a^2}) \cdot b - R \cdot \frac{b}{a} \cdot \arcsin a + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{1 - a^2}}{2} \cdot R \cdot (\cos \Theta_1 \cdot \sqrt{1 - a^2} - \sin \Theta_1 \cdot a) \right], \quad (3)$$

где $a = \sin \psi$; $b = 1 - \sin \Theta_1 \cdot \sqrt{1 - a^2} - a \cdot \cos \Theta_1$

Отметим, что краевой угол Θ является одной из важнейших характеристик и зависит от кривизны контактирующих тел (рис. 2).

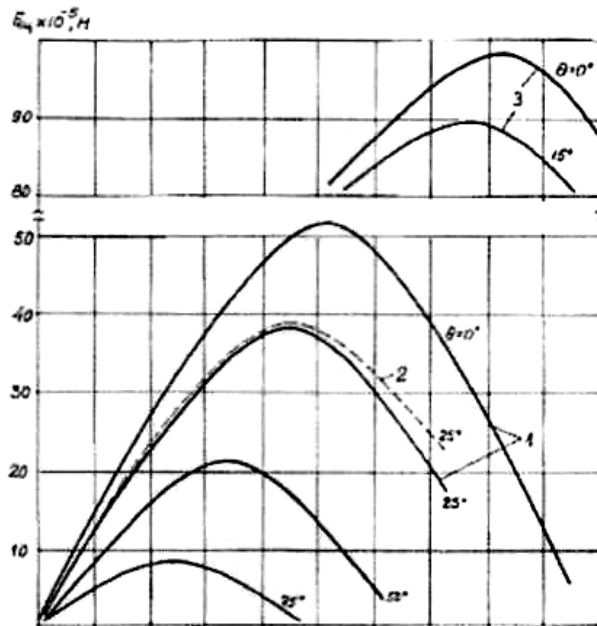


Рис. 2. Зависимость силы сцепления частиц от объема жидкости в точке контакта:
 1 – сферы одинакового диаметра; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – сферы и плоскости

По уравнениям (2) и (3) можно определить количественное значение $F_{ад}$ для различных значений угла Θ и количества жидкости в области контакта частиц. Расчеты выполнены с использованием программы MathCAD-2000, и результаты приведены на рисунке 2. Кривые 1, построенные по результатам теоретических выкладок, характеризуются наличием четкого максимума и обладают свойствами унимодальности.

По экспериментальным данным найдена эмпирическая зависимость.

Таким образом, впервые получены аналитические выражения силы взаимодействия (сцепления) частиц как функции их размеров, расстояния между частицами b , количества жидкости в точке контакта и смачивающей способности жидкости (краевого угла смачивания) для участвующих в гранулообразовании частиц.

Практическое решение проблемы. Процесс получения гранул (окатышей) из сыпучих тонкоизмельченных материалов осуществляется в два этапа. На первом этапе под влиянием местного переувлажнения происходит образование комочков сыпучего материала округлой формы. Под влиянием различного вида механических воздействий плотность комочков возрастает, и избыточная влага выступает на поверхность. Затем, на втором этапе, имеет место рост размеров комочков и превращение их в гранулы путем присоединения исходных частиц на переувлажненную поверхность.

С учётом того, что общий объем воды состоит из тел вращения вокруг осей, и за вычетом объемов сегментов сфер с радиусами R_1 и R_2 , определен объем жидкости при контакте частиц как функции размеров этих частиц, радиуса манжеты и угла смачивания:

$$V_{ад} = \pi \cdot \left\{ \begin{aligned} & r_{12}^{\circ} \cdot \left[\sin \psi^{\circ} \cdot (m \cdot (m - r_{12}^{\circ} \cdot \cos \psi^{\circ}) + r_{12}^{\circ} \cdot (1 - \frac{1}{3} \sin^2 \psi^{\circ})) - m \cdot r_{12} \cdot \psi \right] - \frac{R_1^3}{3} \cdot (1 - \sin(\Theta + \psi'))^2 \cdot (2 + \sin(\Theta + \psi')) + \\ & + r_{22}' \cdot \left[\sin \psi'' \cdot (h \cdot (h - r_{22}' \cdot \cos \psi'') + r_{22}' \cdot (1 - \frac{1}{3} \sin^2 \psi'')) - h \cdot r_{22}' \cdot \psi'' \right] - \frac{R_2^3}{3} \cdot (1 - \sin(\Theta + \psi'')) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Общее количество частиц, прилипших к поверхности частицы большего размера и составляющих монослой на его поверхности, при учете тетраэдрической модели укладки, определяется как:

$$N = 2 \cdot N_1 = N_1 + N_2 \quad (5)$$

где N_1 – число страниц в нечётных слоях;

N_2 – число страниц в чётных слоях:

$$N_1 = \sum_{i=1}^{k/2} \frac{\pi}{\arcsin \frac{1/q}{\cos\left(\arcsin \frac{1/q}{q} \cdot (2 \cdot i - 1)\right)}}, \quad (6)$$

$$N_2 = \sum_{i=1}^{k/2} \frac{\pi}{\arcsin \frac{1/q}{\cos\left(\arcsin \frac{1/q}{q} \cdot (2 \cdot i - 2)\right)}}, \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\arccos \frac{1/q}{q}}{\arcsin \frac{1/q}{q}}, q = \frac{1.1 \cdot R_1 + R_2}{R_1}.$$

Исходя из принятой модели объемная влажность системы «поверхность зародыша - частица» может быть определена из выражения:

$$W = k_y \frac{\gamma_{\epsilon}}{\pi \cdot \gamma_{\text{ТВ}}} \left[\frac{N \cdot V_{\text{В}_1}}{NR_1^3 + R_2^3 - (R_2 - R_1)^3} + \frac{7Q}{R_1^3} \right], \quad (8)$$

где N - число присоединенных частиц;

R_1 - радиус частицы меньшего размера, м;

R_2 - радиус частицы большего размера, м;

$\gamma_{\text{В}}$ - массовая плотность воды, кг/л;

$\gamma_{\text{ТВ}}$ - массовая плотность тонкоизмельченного материала, кг/л;

Q - количество жидкости в точке одного контакта, приходящееся на одну частицу, л.

Уравнение (8) позволяет определять влажность тонкоизмельченного материала для различных фракций с учетом их размеров и количества жидкости в межчастичном пространстве.

Исходя из полученной модели сила сцепления частиц между собой и с зародышем определяется количеством жидкости в точках контакта. При величине $r_1 = 0,1 \cdot R_1$ (где r_1 — радиус водной манжеты) взаимное перетекание жидкости от одного контакта к другому не представляется возможным. Такое состояние характеризуется молекулярной влажностью (МВ). По мере дальнейшего роста количества смачивающей жидкости в точке контакта сцепление частиц возрастает (рис. 2), достигая максимума при значении $r_1 = (0.5...0.53) \cdot R_1$ для случая тетраэдрической укладки частиц, и устанавливается контакт между соседними жидкостными манжетами. Состояние МВ заканчивается максимальной молекулярной влажностью (ММВ) и характеризуется наименьшей капиллярной влажностью (НКВ). При этом наступает фаза начала образования жидкостных капилляров. Дальнейший рост количества жидкости в межчастичном пространстве приводит к уменьшению сцепления частиц (рис. 2), при этом взаимное перемещение их между собой становится более вероятным под влиянием различных динамических нагрузок, совокупность частиц образует более плотную структуру, что приводит к образованию агрегатов, и создаются предпосылки для начала перетекания жидкости между частицами. При дальнейшем увеличении жидкости манжеты ближайших частиц объединяются, и между четырьмя соседними частицами при тетраэдрическом способе укладки сыпучего материала образуются два пузырька заземленного воздуха (радиусом $r_2 = 0,155 \cdot R_1$), которые свободно перемещаются по капиллярам, сила сцепления между отдельными частицами становится еще меньше. Согласно принятой модели, благодаря уменьшению сил капиллярного сцепления возрастает как скорость перетекания жидкости, так и ее роль как смазывающего агента при взаимном перемещении частиц в процессе механических воздействий.

Таким образом, экспериментальные и широко распространенные косвенные показатели влажности материала, такие как ММВ, НКВ, МКВ, и отражающие его способность к гранулообразованию, согласуются и подтверждаются разработанной и представленной теорией взаимодействия частиц. Математическая модель гранулообразования позволяет рассчитать

необходимое значение влажности материала, в зависимости от гранулометрического состава сырья и условий смачивания его жидкостью, которое позволит выбрать оптимальные нагрузки в процессе механических воздействий с тем, чтобы получить наибольшую скорость гранулообразования и максимальную плотность гранул.

Выводы. Цель работы достигнута поскольку авторами получены математические уравнения, позволяющие рассчитать условия гранулообразования увлажненного пылеобразующего материала, обеспечивающие прочность и стабильность гранул, пригодных к безопасной транспортировке морским путём и в конечном счете охрану труда экипажа.

1. Леонов В.Е. Охрана труда экипажа сухогруза (груз - уголь). / В.Е.Леонов, А.В.Букетов, Е.А.Исаев, В.Б.Сыс, Д.Г.Сыс // Науковий вісник ХДМА.-2012 - №1 (6). – С.17-21.
2. Витюгин В.М. Исследование процесса гранулирования окатыванием с учетом свойств комкуемых дисперсий. / В.М.Витюгин // Автореф. дисс. доктора техн. наук.- Томск.- 1975. – С. 50.
3. Дмитриев В.И. Обеспечение безопасности плавания судов и предотвращение загрязнения окружающей среды: монография. / В.И. Дмитриев, В.Е. Леонов, П.Г. Химич, В.Ф. Ходаковский, Л.Б. Куликова / под ред. В.И. Дмитриева, В.Е. Леонова. – Херсон : ХГМА, 2012. – С. 397.