

УДК 622.23.05

Лутс И. О., ассистент АОТ  
Пугач С. И., ассистент каф. АОТ  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ  
КОНВЕЕРНОЙ ЛЕНТЫ**

Лутс І. О., асистент каф. АОП  
Пугач С. І., асистент каф. АОП  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК ВЛАГОЄМНИХ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ  
СИСТЕМ І ПОВЕРХНЕЮ КОНВЕЄРНОЇ СТРИЧКИ**

Luts I. O., asistent  
Pugach S. I., asistent  
(State HEI «NMU»)

**INTERACTING WATER-CONTAINING FINE PARTICLES AND THE  
SURFACE SYSTEMS CONVEYOR BELT**

**Аннотация.** Цель - установление закономерностей взаимодействия между частицами руды и поверхностью конвейерной ленты с целью определения адгезионных свойств влагоемких мелкодисперсных систем влияющих на интенсивность пылеобразования при работе конвейера.

Установлено, что величина капиллярной составляющей силы адгезии зависит от силы поверхности натяжения жидкости, отношения толщины слоя жидкости к радиусу частицы и от кривизны мениска, образованного при смачивании частицы жидкостью.

Разработана математическая модель процесса взаимодействия частиц руды с конвейерной лентой учитывающая силы адгезии и аутогезии.

По результатам исследования намечены пути создания способов и средств для снижения запыленности воздуха в горной выработке.

**Ключевые слова:** конвейерная лента, силы адгезии, запыленность, атмосфера, горная выработка, руда.

**Актуальность.** Силы взаимодействия влагоемких мелкодисперсных систем (глинистые частицы) с конвейерной лентой являются результатом молекулярного взаимодействия [1], которые характеризуются ван-дер-ваальсовскими силами, зависящими от зазора между контактирующими телами. В развитии сил взаимодействия влагоемких мелкодисперсных частиц основная роль принадлежит капиллярным силам, результирующее действие которых вызвано силами поверхностного натяжения менисков воды. Если зазор мал, то силы молекулярного взаимодействия суммируются в капилляры и сила взаимодействия возрастает, а если зазор велик, то возникающее расклинивающее действие воды существенно уменьшает силу взаимодействия.

При достижении капиллярными силами определенной величины со временем происходит самопроизвольное сближение частиц увлажненного глинистого материала между собой и поверхностью ленты, результатом которого является возникновение молекулярной связи между ними. При удалении жидкости из пограничного слоя за счет возможного испарения и перехода жидкости в менее влажные вышележащие слои глины, адгезия которой к ленте увеличивается. Наличие влаги в зоне контакта увлажненного материала и ленты вызывает появление силы сцепления направленной тангенциально к поверхности контакта и силы взаимодействия, направленной нормально к поверхности ленты.

Смачиваемость марганцевой руды водой довольно низкая (65,2%), что связано с минералогическим и фракционным составом пыли и небольшим временем смачивания, недостаточным для набухания глинистых частиц.

Естественная влажность добываемой марганцевой руды в среднем составляет 27%, что превышает максимальную молекулярную влагоемкость. Можно считать, что между транспортируемой рудой и поверхностью конвейерной ленты возникает прослойка жидкости. Количественная оценка взаимодействия частиц марганцевой руды с поверхностью конвейерной ленты при возникновении на ней слоя жидкости имеет важное значение при обосновании и выборе способов и средств снижения адгезии между поверхностями руды и конвейерной ленты.

В связи с изложенным весьма важное значение приобретает расчет сил адгезии между отдельной частицей и поверхностью конвейерной ленты.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим взаимодействие сферической частицы радиуса  $R$  с плоской поверхностью конвейерной ленты при наличии на ней слоя жидкости толщиной  $h$ . Углы смачивания частицы к указанной поверхности будем считать известными (рис. 1).

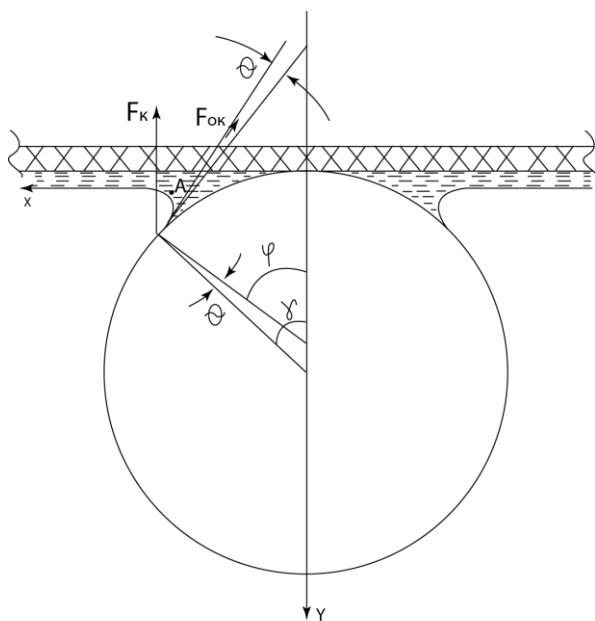


Рисунок 1 - Расчет капиллярной составляющей силы адгезии

Определим форму меридиональной кривой [3] (кривая, вращением которой образуется искривленная поверхность раздела жидкость-газ). Примем за ось  $x$  поверхность жидкости на ленте, за ось  $y$  – вертикальную прямую, проходящую через центр сферической частицы. Пусть  $x$  и  $y$  означают текущие координаты точки, лежащей на меридиональной кривой.

Давление  $P$  внутри жидкости на уровне точки  $A$  равно [4]

$$P = P_0 - \rho g y,$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, Па,  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

То же давление можно выразить по формуле Лапласа [5]

$$P = P_0 - \sigma \cdot k,$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, н/м,  $k$  - абсолютное значение кривизны поверхности жидкости в точке  $A$ , 1/м.

Следовательно

$$\rho g \gamma = P_0 - P = \sigma \cdot k.$$

Считая радиус частиц во много раз больше толщины слоя [6], пренебрегаем в силу этого изменением давления в жидкости по высоте под влиянием гравитационных сил. Тогда

$$P_0 - P = \sigma \cdot k = const.$$

Абсолютное значение кривизны поверхности в точке  $A$  равно

$$k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

где  $R_1$  - радиус кривизны меридиональной кривой, лежащей в плоскости  $xu$ , м,  $R_2$  - радиус кривизны перпендикулярного к меридиональной кривой нормального сечения, м.

Известно, что

$$\frac{1}{R_1} = -\frac{y''}{(1+y'^2)^{1.5}}$$

(штрих обозначает дифференцирование по оси  $x$ ). Радиус кривизны  $R$ , является величиной отрицательной.

Радиус кривизны  $R_2$  легко определить с помощью известной из дифференциальной геометрии теоремы Менье [2], согласно которой

$$x = R_2 \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью нормального сечения и осью  $x$ .

Подставляя в выражение (1) значение  $\cos \alpha$  получим

$$R_2 = \frac{x(1+y'^2)^{0.5}}{y'}.$$

Таким образом, дифференциальное уравнение, определяющее форму меридиональной кривой, примет вид

$$\frac{y'}{(1+y'^2)^{0.5}} - \frac{y''}{(1+y'^2)^{1.5}} = const = 2H \quad (2)$$

Преобразуя выражение (2) к виду

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{xy'}{(1+y'^2)^{0.5}} \right) = 2Hx \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) получим

$$\frac{xy'}{(1+y'^2)^{0.5}} = Hx^2 + B, \quad (4)$$

где  $B$  – постоянная интегрирования.

Выражение (4) после несложных преобразований приводится к виду

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Hx^2 + B}{\sqrt{x^2 - (Hx^2 + B)^2}} \quad (5)$$

откуда

$$y = \int \frac{Hx^2 + B}{\sqrt{x^2 - (Hx^2 + B)^2}} dx + c, \quad (13)$$

где  $c$  – вторая постоянная интегрирования.

Капиллярная составляющая силы адгезии [7], действующая на частицу равна

$$F_k = F_{ок} \sin \varphi, \quad (6)$$

где  $F_{ок}$  - сила поверхностного натяжения, действующая по периметру смачивания и направленная по касательной к мениску,  $H$ ;  $\varphi$  – угол между касательной к мениску в точке наивысшего поднятия жидкости и перпендикуляром к оси  $x$ , рад.

$$F_{ок} = 2\pi\sigma \cdot x, \quad (7)$$

где  $x$  – ордината точки наивысшего поднятия жидкости.

$$x = R \sin \gamma, \quad (8)$$

где  $\gamma$  - угол между радиусом, проведенным в точку наивысшего поднятия жид-

кости и радиусом, проведенным в точку касания частицы с поверхностью ленты.

Из чертежа (см. рис.1) следует

$$\cos \gamma = \frac{R - h - y}{R} = 1 - \frac{h}{R} - \frac{y}{R}, \quad (9)$$

где  $y$  – ордината точки наивысшего поднятия жидкости.

Считая, что  $y$  значительно меньше  $R$ , из выражения (9) получим

$$\cos \gamma = 1 - \frac{h}{R}$$

откуда

$$\sin \gamma = \sqrt{\frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2}}. \quad (10)$$

Используя известное из тригонометрии соотношение [8]

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

и учитывая выражение (5), получим

$$\sin \varphi = \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} = \frac{Hx^2 + B}{x}. \quad (11)$$

Подставим выражение (7) и (11) с учетом выражений (8) и (10) в формулу (6), получим

$$F_k = 2\pi\sigma \cdot R^2 H \left( \frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right) + 2\pi\sigma \cdot B, \quad (12)$$

При  $h = 0$ ,  $F_k = 0$ , тогда  $B = 0$  и выражение (11) примет вид

$$F_k = 2\pi\sigma \cdot R^2 H \left( \frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right).$$

Частица будет удерживаться на поверхности [9], если  $F_k \geq P$ , где  $P = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$  – сила тяжести, действующая на частицу,  $H$ ;  $\rho$  – плотность частицы.

Разделить обе части выражения (12) на силу тяжести [10], действующую на частицу, получим

$$\frac{F_k}{P} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\sigma}{\rho g} \cdot \frac{H}{R \left( \frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right)}$$

**Вывод.** На основании выполненных исследований определены параметры взаимодействия между частицами влагоемких мелкодисперсных систем и поверхностью конвейерной ленты.

Установлено, что величина капиллярной составляющей силы адгезии зависит от поверхности натяжения жидкости, отношения толщины слоя жидкости к радиусу частицы и кривизны мениска, образованного при смачивании частицы жидкостью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - 76 с.
2. Лінійна алгебра та аналітична геометрія. Навч. Підручник / Ю.К.Рудавський, П.П.Костробій, Х.П.Луник [та ін.]. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2002, - 262с.
3. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учеб. для ВУЗов 2-е изд., перераб. и доп./ Ю.Г. Фролов. - М.: Химия, 1988. – 464 с.
4. Сумм, Б.Д. Основы коллоидной химии / Сумм Б.Д. - М.: Академия, 2006. - 239 с.
5. Шахмейстер, Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г.Шахмейстер, В. Г. Дмитриев.- М.: Машиностроение, 1978. – 392 с.
6. Тарасов, Ю. Д. Подъемно-транспортные машины металлургических заводов / Ю.Д. Тарасов, А. К. Николаев. –СПб.: Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В. Плеханова, 1995. – 259 с.
7. Киттель, Ч. Статистическая термодинамика: Пер. с англ. / Под ред. С.П. Капицы. – М.: Наука, 1997. – 336 с.
8. Егоров, П.А. О термодинамике и кинетике процесса массопереноса / П.А. Егоров // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – 1998. – Вип. 1(42). – С. 111-114.
9. Егоров, П.А. Термодинамические аспекты процессов обогащения полезных ископаемых / П.А. Егоров // Сб. научн. тр. НГА Украины. – 1998. – № 3, т. 4. – С. 172-177.
10. DeRosa, M.I. Industrial Hygienist / M.I.DeRosa // Pittsburgh Research Laboratory, NIOSH, Personal Communication, March 22, 2008. – p. 124-132.

#### REFERENCES

1. Shubin, I. N. Sviridov, M.M. and Tarov, V.P. (2005), *Tekhnologicheskie mashyny i oborudovanie. Sybuchie materialy i ikh svoystva* [Technological machinery and equipment. Bulk materials and their properties], Izdatelstvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Tambov, Russia.
2. Rudavsky, Y.K., Kostrobii, P. P., Lunik, J. P. and Uhanska, D.V. (2002), *Liniyna algebra ta analitichna geometriya* [Linear algebra and analytic geometry], Vidavnitstvo "Beskid Bit", Lviv, Ukraine.
3. Frolov, Y. U. (1988), *Kurs kolloidnoy khimii. Povtrkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [The course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems], Khimiya, Moscow, USSR.
4. Summ, B.D. (2006), *Osnovy kolloidnoy khimii* [Fundamentals of colloidal chemistry], Akademiya, Moscow, Russia.
5. Shahmeyster, L.G. and Dmitriev, V.G. (1978), *Teoriya i raschet lentochnykh konveerov* [Theory and Design of belt conveyors], Mashinostroenie, Moscow, USSR.
6. Tarasov, Yu.D. and Nikolaev, A. K. (1995), *Podemno-transportnye mashyny metallurgicheskikh zavodov* [Handling machinery metallurgical plants], St. Petersburg Mining Institute, St. Petersburg, Russia.
7. Kittel, Ch. (1997), *Statisticheskaya termodinamika* [Statistical thermodynamics], Kapitsa, S.P. (ed), Nauka, Moscow, Russia.
8. Egorov, P.A. (1998), "On the thermodynamics and kinetics of mass transfer process", *Obagashchenie poleznykh iskopaemykh*, vol. 1 (42), pp. 111-114.

9. Egorov, P.A. (1998), "Thermodynamic aspects of processes, owls enrichment of minerals", *Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnogo gornogo universiteta*, no. 3, vol. 4, pp. 172-177.

10. DeRosa, M.I. (2008), "Industrial Hygienist", *Pittsburgh Research Laboratory, NIOSH, Personal Communication*, March 22, pp.124-132.

---

#### Об авторах

**Лутс Игорь Олегович**, магистр, ассистент кафедры Аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, [i.luts.aot@gmail.com](mailto:i.luts.aot@gmail.com).

**Пугач Сергей Иванович**, магистр, ассистент кафедры Аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина., [sagio@yandex.ru](mailto:sagio@yandex.ru).

#### About the authors

**Luts Igor Olegovich**, Master of Sciences, Assistant of Department of Aerology and safety, State Higher Educational Institution «NationalMining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, [i.luts.aot@gmail.com](mailto:i.luts.aot@gmail.com).

**Pugach Sergei Ivanovich**, Master of Sciences, Assistant of Department of Aerology and safety, State Higher Educational Institution «NationalMining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, [sagio@yandex.ru](mailto:sagio@yandex.ru).

---

**Анотація.** Мета - встановлення закономірностей взаємодії між частинками руди і поверхнею конвеєрної стрічки з метою визначення адгезійних властивостей вологоємних дрібнодисперсних систем впливають на інтенсивність пилоутворення при роботі конвеєра. Встановлено, що величина капілярної складової сили адгезії залежить від поверхні натягу рідини, відношення товщини шару рідини до радіусу частинки і від кривизни меніска, утвореного при змочуванні частинки рідиною.

Розроблено математичну модель процесу взаємодії частинок руди з конвеєрною стрічкою враховує сили адгезії і аутогезії.

За результатами дослідження намічені шляхи створення способів і засобів для зниження запиленості повітря в гірничій виробці

**Ключові слова:** конвеєрна стрічка, сили адгезії,запиленість,атмосфера,гірничавиробка, руда.

**Abstract.** Establish patterns of interaction between the ore particles and the surface of the conveyor belt in order to determine the adhesive properties of finely dispersed vacuum systems influencing the intensity of dust during operation of the conveyor.

The value of the capillary component of the adhesive force depends on the surface tension of the liquid, the ratio of the thickness of the liquid layer to the radius of the particle and the curvature of the meniscus formed by wetting liquid particles.

A mathematical model of the interaction between the particles of ore with a conveyor belt which takes into account the forces of adhesion and autohesion.

The study identified ways to create ways and means to reduce particulate air pollution in mining.

**Keywords:** conveyor belt, adhesive force, dust, environment, mining, ore.

*Статья поступила в редакцию 13.09.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*