

УДК 621.867

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧКИ ОТРЫВА ЧАСТИЦЫ ВЛАЖНОГО НАСЫПНОГО ГРУЗА С БАРАБАНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Ерофеева Н.В., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Вопросами определения точки отрыва материала с барабанов различного назначения занимались многие отечественные и зарубежные ученые. При этом рассматривалась схема разгрузки насыпного груза с барабана как с учетом минимального количества действующих на частицу сил [1, 2], так и с учетом силы адгезии, сопротивления воздушного потока, напряжения в насыпном грузе и т. д. [3].

При этом каждым автором было предложено определение значения угла отрыва частицы от барабана и траектории движения частиц груза при свободном падении после отрыва от барабана по характерной для них методике. Сравнительный анализ зарубежных методик подробно приведен в литературе [3]. В некоторых методиках рассматривается вопрос скольжения материала по поверхности барабана [4].

На основе наличия многочисленных методик появляется задача разработки или приближения существующих методик для наиболее полного описания процесса разгрузки насыпного влажного груза с барабана ленточного конвейера [5].

Процесс движения частицы на разгрузочном барабане определяем следующим образом. Барабан разбиваем на три сектора и наносим силы, действующие на частицу, находящуюся первоначально в первом секторе (рис. 1). В случае если на данном участке не произошел отрыв частицы от барабана, а барабан развернулся на угол 90° , частица соответственно переместится в следующий сектор, где действующие на нее силы поменяют свое месторасположение и направление. При условии, что возле разгрузочного барабана установлен отклоняющий барабан, и, удержавшись на поверхности барабана в первых двух секторах, частица может уйти после поворота барабана на угол 180° в третий сектор, где также действующие на нее силы изменят свое направление. Если отклоняющий барабан не предусмотрен, то частица перейдет на горизонтальный участок конвейера и продолжит движение совместно с лентой до точки отрыва или уйдет под очистительный скребок (особенно это касается мелких частиц или частиц воды).

Выбирается прямоугольная декартова система координат, ось абсцисс (X) которой параллельна оси конвейерной ленты и ось ординат (Y), расположенную перпендикулярно к ней (см. рис. 1) [5].

Согласно методу кинестатики в каждый момент времени сумма главных векторов активных сил, реакции связей и сил инерции движущейся материальной системы равна нулю [6], т. е.

$$\Sigma \bar{F}_a + \Sigma \bar{F}_r + \Sigma \bar{F}_{ин} = 0. \quad (1)$$

На частицу действуют следующие силы: F_G – сила тяжести частицы; $F_{тр}$ – сила трения частицы по разгрузочному барабану (ленте); $X_{ин}, Y_{ин}$ – составляющие сил инерции частицы; $F_{ин}$ – центробежная сила инерции частицы; $F_{адг}$ – сила адгезии; $F_{аут}$ – сила аутогезии; G_{vs} (G_{ns}) – вес вышележащих (или нижележащих слоев при нахождении частицы во II и III секторах) над частицей слоев насыпного груза; $F_{тр1-2}, F_{тр2-3}, F_{тр3-4}, F_{тр1-4}$ – сила трения соответствующих граней частицы о насыпной груз; F_{b1-2}, F_{b3-4} – сила бокового давления насыпного груза на соответствующие грани частицы; F_v – сила сопротивления воздуха; F_{pd} – подъемная сила аэродинамического характера.

Составляющие сил инерции частицы определяются следующим образом [5]

$$X_{ин} = -\frac{G}{g} \cdot \frac{d^2 x_c}{dt^2} \quad \text{и} \quad Y_{ин} = -\frac{G}{g} \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2}. \quad (2)$$

где $\frac{d^2 x_c}{dt^2}, \frac{d^2 y_c}{dt^2}$ – ускорение частицы в тангенциальном и радиальном направлении; g – ускорение свободного падения; G – вес частицы.

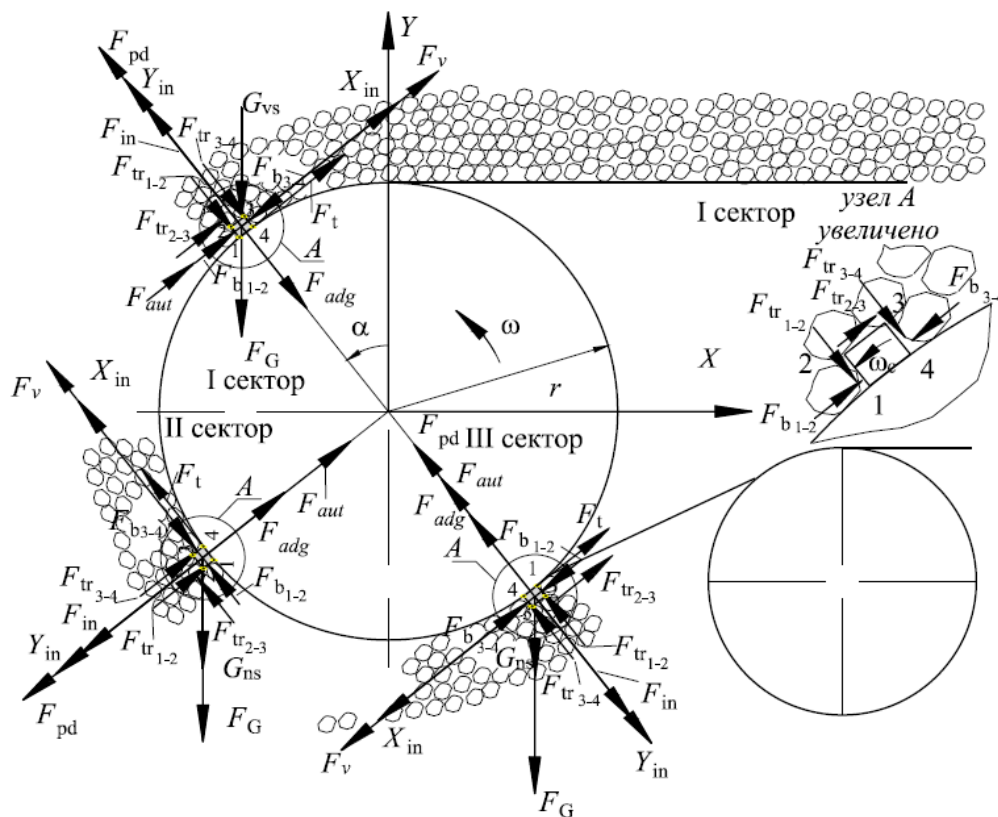


Рис. 1. Схема действия сил на частицу при движении по барабану конвейера

Центробежная сила инерции частицы определится как

$$F_{in} = \frac{G}{g} \cdot \omega_c^2 \cdot r, \quad (3)$$

где r – радиус разгрузочного барабана с учетом толщины ленты; $\omega_c = \frac{d\alpha}{dt}$ – угловая скорость частицы.

Сила сопротивления воздуха

На частицу, находящуюся на движущейся со скоростью V конвейерной ленте, оказывает давление воздушная среда. Под действием этого давления происходит ее сдувание в противоположном движению ленты направлении. Величину силы давления на частицу можно определить по формуле [7–9] с учетом поправки на несферичность частицы

$$F_v = k_6 \frac{1}{2} c S \rho (V - V_c)^2, \quad (4)$$

где $c = 24/Re_c$ – коэффициент сопротивления частицы; ρ – плотность воздуха; S – миделевое сечение частицы; $Re_c = d_c V_{отн}/\nu$ – характерное число Рейнольдса обтекания частицы [10]; $V_{отн}$ – скорость движения частицы относительно воздушного потока; ν – кинематический коэффициент вязкости воздушной струи; d_c – диаметр частицы; k_6 – коэффициент формы, учитывающий несферичность частицы, равный $k_6 = 1/\Phi^2$; Φ – фактор формы, равный отношению площади поверхности сферы, имеющей тот же объем, что и рассматриваемая частица к ее площади поверхности [11].

Аэродинамическая сила воздушного потока

Предполагаем, что конвейер установлен в неподвижной воздушной среде. Однако, частица, находящаяся на ленте, будет обдуваться воздушным потоком, созданным движущейся лентой. Возникает аэродинамическая сила воздушного потока. Направление этой подъемной силы всегда направлено к той стороне вращающейся частицы, на которой направление потока и вращение частицы совпадают (см. рис. 2) [7].

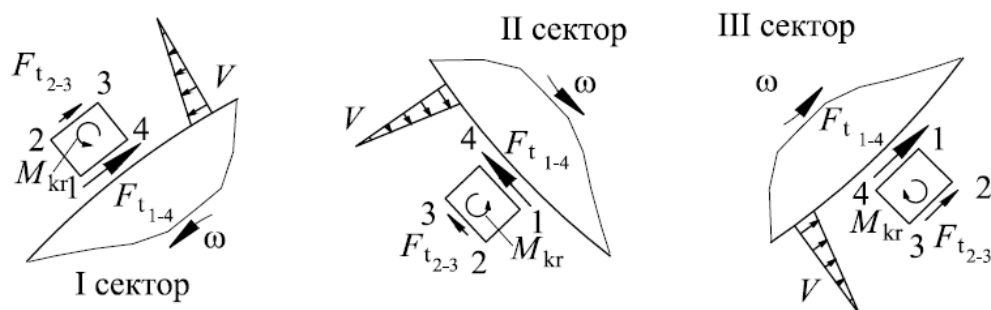


Рис. 2. Схема к определению направления подъемной силы аэродинамического происхождения

Величина подъемной силы может быть определена как [7]

$$F_{pd} = \rho S d_c V \frac{dV}{dy}, \quad (5)$$

где dV/dy – градиент скорости.

Сила адгезии и аутогезии

При транспортировании влажного насыпного груза при соприкосновении частицы с поверхностью ленты возникает адгезия, а при контакте частиц между собой – аутогезия [7]. Сила адгезии зависит от площади контакта, а силы аутогезии определяются формой и состоянием поверхности частиц.

Величину силы адгезии с некоторым допущением можно выразить зависимостью [7]

$$F_{adg} = \frac{h\omega}{8\pi z_0^2} r_c, \quad (6)$$

где $h\omega$ – константа Лифшица-Планка; z_0 – зазор между частицей и плоскостью; r_c – радиус частицы.

Связь между частицами во влажных насыпных грузах в основном обуславливается действием капиллярных сил. Насыпной груз испытывает действие капиллярного давления при частичном заполнении пор между частицами [12]. Это давление стремится удержать частицы вместе. Максимальную величину капиллярных сил можно определить по

$$F_{aut} = F_k = 2\pi\sigma_k r_c, \quad (7)$$

где σ_k – поверхностное натяжение.

Вес вышележащих над частицей слоев насыпного груза

Согласно Р. Л. Зенкову [13] при расчете давления насыпного груза на стенки тела принимается, что траектории главных напряжений являются вертикальными и горизонтальными прямыми. Тогда гидростатическое давление $\frac{G_{vs}}{S} = h_c \rho_0 g$ явится наибольшим главным напряжением, а боковое давление $\frac{F_b}{S} = h_c \rho_0 g m$ – наименьшим главным напряжением (где ρ_0 – насыпная плотность; m – коэффициент подвижности; h_c – высота слоя насыпного груза при разгрузке барабана, измеренная в вертикальной плоскости).

Форма поверхности насыпного груза приближена к «крышеобразной» после выполаживания конвейерной ленты перед разгрузочным барабаном. Высота слоя насыпного груза рассчитывается приближенным способом, основанным на замене поперечного сечения треугольной формы на прямоугольную. В этом случае приведенная высота слоя материала подставляется в качестве расчетной высоты слоя материала. Приведенная высота слоя насыпного материала определяется при «крышеобразной» свободной поверхности

$$h_{пр} = h - \frac{0,9B \operatorname{tg} \psi}{4}, \quad (8)$$

где ψ – угол естественного откоса насыпного груза в движении; B – ширина конвейерной ленты; h – высота насыпного груза, измеренная в перпендикулярном к ленте направлению и в среднем сечении ленты по ширине.

Вес вышележащего слоя и сила бокового давления определяются как

$$G_{vs} = \frac{h_{\text{тр}}}{\cos \alpha} \rho_0 g S, \quad (9)$$

$$F_b = \frac{h_{\text{тр}}}{\cos \alpha} \rho_0 g m S. \quad (10)$$

Под действием сил F_b бокового давления и веса G_{vs} вышележащего слоя возникает сила трения $F_{\text{тр}1-2}$, $F_{\text{тр}2-3}$, $F_{\text{тр}3-4}$ по соответствующим граням.

Дифференциальное уравнение отрыва частицы от поверхности барабана

Спроецировав рассмотренные силы на касательную к поверхности разгрузочного барабана, составляем дифференциальное уравнение движения частицы и значение нормальной реакции частицы на поверхность барабана при ее нахождении

в I секторе:

$$\begin{cases} \frac{G}{g} r \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -G \sin \alpha - G_{vs} \sin \alpha + F_{\text{aut}} + fN + F_v + F_{\text{тр}2-3}; \\ N = G \cos \alpha + G_{vs} \cos \alpha + F_{\text{adg}} - \frac{G}{g} r \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + F_{\text{тр}1-2} + F_{\text{тр}3-4} - F_{\text{pd}}. \end{cases} \quad (11)$$

во II секторе:

$$\begin{cases} \frac{G}{g} r \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -G \cos(\alpha - 90^\circ) - G_{ns} \cos(\alpha - 90^\circ) + fN + F_v + F_{\text{тр}2-3}; \\ N = -G \sin(\alpha - 90^\circ) - G_{ns} \sin(\alpha - 90^\circ) + F_{\text{adg}} - \frac{G}{g} r \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + F_{\text{тр}1-2} + \\ + F_{\text{тр}3-4} - F_{\text{pd}} + F_{\text{aut}}. \end{cases} \quad (12)$$

в III секторе:

$$\begin{cases} \frac{G}{g} r \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = G \sin(\alpha - 180^\circ) + G_{ns} \sin(\alpha - 180^\circ) - fN + F_v - F_{\text{тр}2-3}; \\ N = -G \cos(\alpha - 180^\circ) - G_{vs} \cos(\alpha - 180^\circ) + F_{\text{adg}} - \frac{G}{g} r \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + F_{\text{тр}1-2} + \\ + F_{\text{тр}3-4} + F_{\text{pd}} + F_{\text{aut}}. \end{cases} \quad (13)$$

где f – коэффициент трения частицы о поверхность барабана (с учетом ленты).

Подставив нормальную реакцию N , проведя тождественные преобразования, и понизив проядок дифференциального уравнения, получим угловую скорость частицы [14]. В дальнейшем, полученное выражение для определения угловой скорости подставим в выражение для определения N и, приравняв нормальную реакцию нулю, выразим угол отрыва частицы от барабана.

Список литературы

1. Иванченко, Ф. К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин : учеб. для вузов. – Киев, 1983. – 351 с.
2. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М. :Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.
3. Hastie, D. B., Wypych, P. W. Conveyor trajectory prediction methods - a review. Bulk Materials Handling Conference, BULKEX 2006, p. 1–15, Melbourne: Australian Bulk Handling.
4. Товбин, Л. И. Движение сыпучих материалов по разгрузочному барабану ленточного конвейера // Известия вузов. Пищевая технология. – 1991. – №1–3. – С. 194–197.
5. Ерофеева, Н. В. Описание процесса движения частицы на разгрузочном барабане ленточного конвейера / Н. В. Ерофеева, И. В. Антонова // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников XI Междунар. науч. конф. – Белово, 2018.
6. Горбач, Н. И. Теоретическая механика : краткий справочник / Н. И. Горбач, В. Д. Тульев. – М. : ИНФРА-М, 2004. – 192 с.
7. Соболев, А. А. Движение частиц в воздушном потоке / А. А. Соболев, П. А. Мельников, А. О. Тютюнник // Вектор науки ТГУ. – 2011. – №3. – С. 82–86.
8. Спиридонов, Ф. Ф. Исследование неравновесности течения при микрофлотации / Ф. Ф. Спиридонов, А. Г. Овчаренко, И. В. Молочнов // Известия Алтайского государственного университета. – 2000. – №1. – С. 27–29.
9. Динамика капель диспергированной струи в поперечном потоке газа / О. В. Долгушина, Н. И. Платонов, В. С. Белоусов, Д. М. Долгушин // Вестник Челябинского государственного университета. – 2012. – №30 (284). – С. 26–31.
10. Харьков, В. В. Численное исследование траекторий движения капель в вихревом аппарате для концентрирования фруктовых соков / В. В. Харьков, А. Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №16. – С. 191–193.
11. Асламова, В. С. Характер движения частиц пыли в прямоточном циклоне с промежуточным отбором пыли / В. С. Асламова, А. А. Асламов, Т. Н. Мусева // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 166–171.
12. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

13. Зенков, Р. Л. Механика насыпных грузов (основания расчета погрузочно-разгрузочных и транспортных устройств). – Москва, 1964. – 252 с.
14. Ильченко, А. А. Математическое моделирование работы аэродинамического сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета.– 2014. – №2. – С. 132–137.