

Р.В. Кирия, канд. техн. наук,
В.Ю. Максютенко, канд. техн. наук,
Т.Ф. Мищенко, мл. научн. сотр.,
Б.И. Мостовой, мл. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАСЫПНОГО ГРУЗА С ОТБОЙНЫМ ЩИТОМ

Розроблено математичну модель взаємодії потоку насипного вантажу з відбійним щитом з урахуванням структурно-механічного стану насипного вантажу. Визначено параметри підпорого клину, який утворюється на відбійному щиті, та знайдено умови утворення завалу.

ON INTERACTION OF PILED-UP LOAD WITH RETREAT SHIELD

The mathematical model of interaction of piled-up load stream with a retreat shield is developed taking into account the structural and mechanical state of piled-up load. The parameters of support wedge which appears on a retreat shield are determined and the terms of obstruction formation are found/

При транспортировании насыпных грузов ленточными конвейерами на горных предприятиях в настоящее время широкое применение получили перегрузочные узлы с отбойным щитом.

Отбойный щит применяется при больших скоростях конвейера и предназначен для уменьшения горизонтальной скорости потока насыпного груза при его перегрузке с одного конвейера на другой.

При этом возникает задача определения сил, действующих на отбойный щит со стороны потока насыпного груза, а также условий нормальной работы отбойного щита, т.е. работы без завала.

Для решения этой задачи необходимо разработать адекватную математическую модель взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом.

Вопросами изучения взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом занимались многие исследователи [1-3].

В работе [1] рассмотрена задача взаимодействия потока насыпного груза с твердой стенкой. Авторы установили, что при взаимодействии потока насыпного груза со стенкой образуется застойная зона, называемая подпорным клином. При этом теоретически определены скорость потока насыпного груза в момент отрыва от твердой стенки и силы, действующие на стенку со стороны потока насыпного груза. Кроме того, в работе [1] определены параметры подпорного клина (высота и длина подпорного клина), образующегося на стенке.

В работе [2] были проведены экспериментальные исследования по определению скорости потока насыпного груза в момент отрыва от твердой стенки. Полученные результаты показали, что скорость потока насыпного груза в момент отрыва от стенки существенно отличается от теоретических результатов, полученных в работе [1].

В работе [3] также рассмотрена задача взаимодействия потока насыпного груза с твердой стенкой. Насыпной груз в той работе рассматривается как связанная пластическая сыпучая среда, которая подчиняется закону Кулона-Мора.

Однако экспериментальные исследования показали, что при повороте потока насыпного груза при взаимодействии с твердой стенкой сила сопротивления существенно меньше касательной силы, рассчитанной по теории Кулона-Мора.

Как следует из визуальных наблюдений [1-3], насыпной груз при взаимодействии с отбойным щитом в зоне подпорного клина находится в пластическом состоянии, при этом сам поток насыпного груза находится в свободно-дисперсном состоянии [4].

Следовательно, описать движение потока насыпного груза при его взаимодействии с отбойным щитом на основе теории Кулона-Мора, т.е. предполагая, что насыпной груз находится только в пластическом состоянии, невозможно.

Целью работы является разработка адекватной математической модели взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом с учетом его структурно-механического состояния (пластического и свободно-дисперсного).

Согласно работе [1], при взаимодействии потока насыпного груза с отбойным щитом образуются две зоны: зона подпорного клина I, зона поворота потока насыпного груза II (рис.1). В зоне подпорного клина насыпной груз почти неподвижен и находится в пластическом состоянии. Поэтому, согласно [5], в этой зоне для насыпного груза справедлив закон Кулона, и насыпной груз описывается уравнениями пластического состояния сыпучих сред. В зоне поворота насыпной груз находится в свободно-дисперсном состоянии, движется по неподвижной части, являющейся продолжением зоны подпорного клина [4]

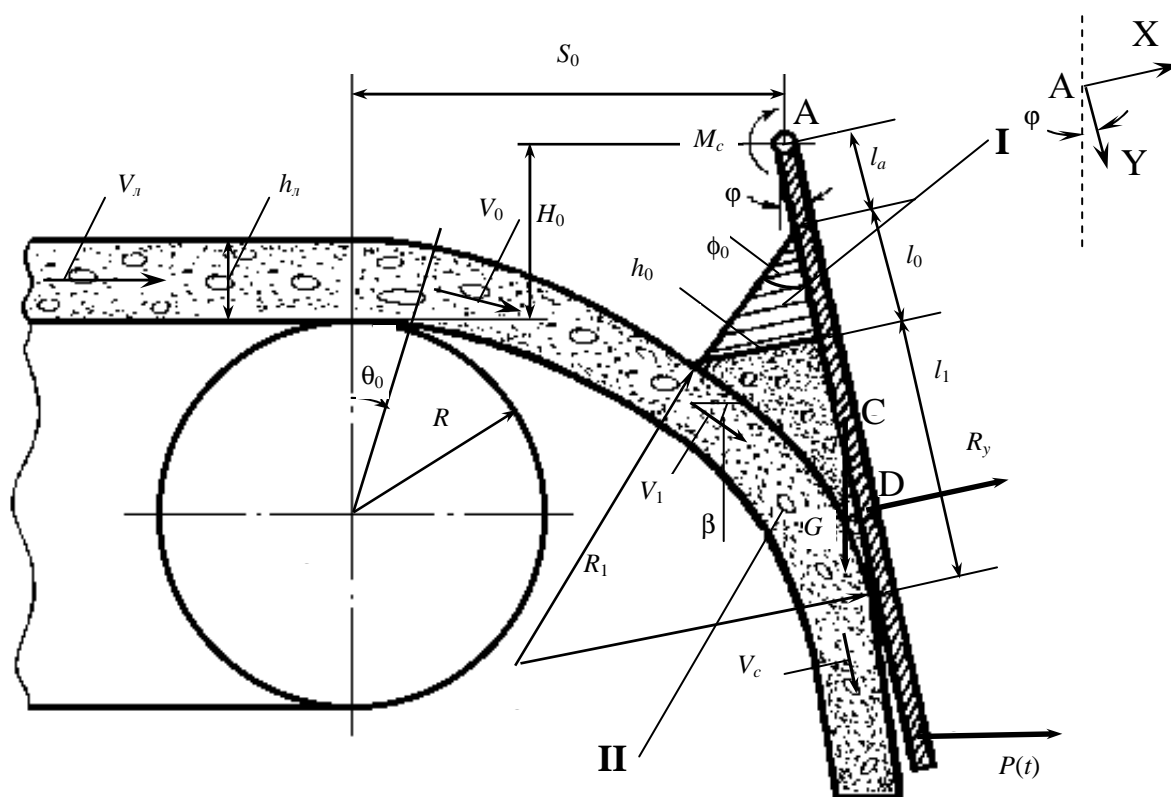


Рис.1 – Расчетная схема определения параметров подпорного клина при взаимодействии насыпного груза с отбойным щитом

Рассмотрим зону подпорного клина I. Согласно[5], угол наклона подпорного клина ϕ_0 на отбойном щите определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\phi_0 = \frac{\cos\varphi - f_1 \sin\varphi}{f_1 \cos\varphi - n_1 \sin\varphi}$$

или

$$\operatorname{tg}\phi_0 = \frac{1 - f_1 \operatorname{tg}\varphi}{f_1 - n_1 \operatorname{tg}\varphi}, \quad (1)$$

где φ – угол между щитом и вертикальной осью, рад; f_1 – коэффициент трения насыпного груза о щит; n_1 – коэффициент бокового распора, зависящий от коэффициента внутреннего трения насыпного груза.

На подпорный клин и неподвижный участок поворотной зоны вдоль полки действуют составляющая реактивной силы струи, составляющая силы веса подпорного клина и сила трения подпорного клина об отбойный щит.

Найдем условия, при которых возникает подпорный клин, и определим его высоту h_0 . Для этого применим теорему об изменении количества движения для сплошной среды в форме Эйлера к насыпному грузу между сечениями 1-1 и 2-2, включая зоны I и II (см. рис. 1). В проекциях на оси OX и OY получим

$$\begin{cases} \frac{\gamma}{g} Q[V_1 \sin(\varphi + \beta) - V_c] - R_x + G \cos\varphi = 0, \\ \frac{\gamma}{g} Q[-V_1 \cos(\varphi + \beta)] + R_y + G \sin\varphi = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где V_1 – скорость потока насыпного груза в момент входа в поворотную зону (в сечении 1-1), м/с; V_c – скорость потока насыпного груза в конце зоны поворота (в сечении 2-2), м/с; Q – производительность конвейера, м³/с; β – угол между вектором скорости на входе в поворотную зону и горизонталью, рад; R_x, R_y – проекции силы реакции полки от потока насыпного груза на оси OX и OY, соответственно, Н; G – суммарный вес насыпного груза в зонах I и II, Н; γ – удельный вес груза, Н/м³.

Суммарный вес насыпного груза в зонах I и II равен:

$$G = \gamma \frac{h_0}{2} l_0 b_1 + \gamma \frac{h_0 + h_c}{2} l_1 b_1, \quad (3)$$

где h_0 – высота подпорного клина на полке, м; l_0 – длина подпорного клина, м; l_1 – длина поворотной зоны, м; h_c – глубина потока насыпного груза на выходе из поворотной зоны, м; b_1 – ширина потока насыпного груза в поворотной зоне, м.

Из рисунка 1 имеем

$$l_0 = h_0 \operatorname{ctg} \phi_0 \quad (4)$$

и

$$l_1 = R_1 \cos(\varphi + \beta), \quad (5)$$

где R_1 – наружный радиус поворота потока (струи) насыпного груза, м.

Определяем R_1 по формуле (см. рис. 1)

$$R_1 = \frac{h_0}{1 - \sin(\varphi + \beta)}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим

$$l_1 = K_1 h_0, \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{\cos(\varphi + \beta)}{1 - \sin(\varphi + \beta)}.$$

Так как насыпной груз вблизи поверхности отбойного щита в поворотной зоне находится в пластическом состоянии, то по закону Кулона имеем

$$R_x = f_1 R_y. \quad (8)$$

Умножив второе уравнение системы (2) на f_1 и сложив с первым с учетом (3), (4), (7) и (8), после преобразования получим квадратное уравнение относительно h_0

$$M_1 h_0^2 + N_1 h_0 + P_1 = 0, \quad (9)$$

где

$$M_1 = (\cos \varphi + f_1 \sin \varphi)(K_1 + \operatorname{ctg} \phi_0),$$

$$N_1 = (\cos \varphi + f_1 \sin \varphi) K_1 \operatorname{ctg} \phi_0,$$

$$P_1 = \frac{2Q}{gb_1} \{V_1 [\sin(\varphi + \beta) - f_1 \cos(\varphi + \beta)] - V_c\}.$$

Анализ устойчивости корней уравнения (9) показал, что если $M_1 > 0$ и $P_1 < 0$, то существует один устойчивый положительный корень уравнения. В этом случае на отбойном щите образуется подпорный клин, высота которого определяется из выражения

$$h_0 = \frac{-N_1 + \sqrt{N_1^2 - 4M_1 P_1}}{2M_1}. \quad (10)$$

Если $M_1 \leq 0$ и $P_1 \geq 0$, то либо оба корня уравнения (9) отрицательные либо действительных корней не существует. В этом случае на отбойном щите подпорный клин не образуется и $h_0 = 0$.

Если $M_1 \leq 0$, то либо существует один неустойчивый положительный корень уравнения (9), либо оба корня отрицательные, либо действительных корней не существует. В этом случае высота подпорного клина h_0 неограниченно увеличивается, т.е. происходит завал.

Для определения скорости V_c и глубины потока насыпного груза на выходе из поворотной зоны воспользуемся уравнением Бернулли [6] для струи сыпучей среды в сечениях 0-0 и 2-2 (см. рис. 1).

В результате получим

$$z_0 + h_n \cos \theta_0 + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_n + \zeta_m), \quad (11)$$

где V_0 , θ_0 – скорость и угол потока насыпного груза в момент отрыва от барабана, м/с, рад; h_n – глубина потока насыпного груза в момент отрыва от барабана конвейера, м; z_0 – перепад высот между сечениями 0-0 и 2-2, м; α_n – коэффициент неравномерности эпюры скорости потока насыпного груза по сечению ($\alpha_n = 1,1-1,2$); ζ_m – коэффициент местных потерь механической энергии на повороте потока насыпного груза на полке ($\zeta_m = 10-20$) [6].

Из-за малости h_c по сравнению с z_0 , первым членом в левой части равенства (11) можно пренебречь.

В результате имеем

$$z_0 + h_0 \cos \theta_0 + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_n + \zeta_m). \quad (12)$$

Из последнего равенства определяем V_c . В результате получим

$$V_c = \sqrt{\frac{2gE_0}{\alpha_n + \zeta_m}}, \quad (13)$$

где

$$E_0 = z_0 + h_0 \cos \theta_0 + \frac{V_0^2}{2g}.$$

В зоне поворота потока насыпного груза на отбойном щите согласно [7] имеем

$$\zeta_m = e^{-\mu\psi}, \quad (14)$$

где μ – безразмерная константа, зависящая от физико-механических свойств насыпного груза ($0 < \mu < 1$), которая определяется экспериментально; ψ – угол поворота потока насыпного груза на отбойном щите, рад.

Этот угол, согласно рисунку 1, определяется по формуле

$$\psi = \frac{\pi}{2} - (\varphi + \beta). \quad (15)$$

Касательная R_x и нормальная R_y составляющие силы, действующей на отбойный щит, определяются из системы (2) с учетом (8). В результате получим

$$R_x = f_1 \left[\frac{\gamma}{g} QV_1 \cos(\varphi + \beta) - G \sin \varphi \right]; \quad (16)$$

$$R_y = \frac{\gamma}{g} QV_1 \cos(\varphi + \beta) - G \sin \varphi. \quad (17)$$

Следовательно, величина результирующей силы, действующей на отбойный щит со стороны потока насыпного груза, определяется по формуле

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Подставляя в последнее равенство (16) и (17), после преобразования получим

$$R = \left[\frac{\gamma}{g} QV_1 \cos(\varphi + \beta) - G \sin \varphi \right] (1 + f_1^2). \quad (18)$$

Анализ решения уравнения (9) показал, что, изменяя угол наклона щита от вертикали, можно уменьшить высоту подпорного клина до нуля.

Для проверки на адекватность математической модели взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом, а так же для проверки основных допущений, принятых в теоретических исследованиях, были проведены эксперименты.

На рис. 2,а,б показаны графики теоретических зависимостей высоты подпорного клина h_0 от производительности Q (при $\varphi = 0$) (рис. 2,а) и от угла наклона отбойного щита φ (рис. 2,б), рассчитанных по формуле (10) для песка. Там же черными кружками показаны результаты экспериментальных исследований для песка. При этом скорость ленты конвейера $V_n = 3,15$ м/с, диаметр барабана $D = 0,11$ м, ширина ленты конвейера $b_n = 0,1$ м, расстояния по горизонтали и вертикали от точки подвеса отбойного щита до центра барабана $S_0 = 0,17$ м, $H_0 = 0,17$ м соответственно (см. рис. 1).

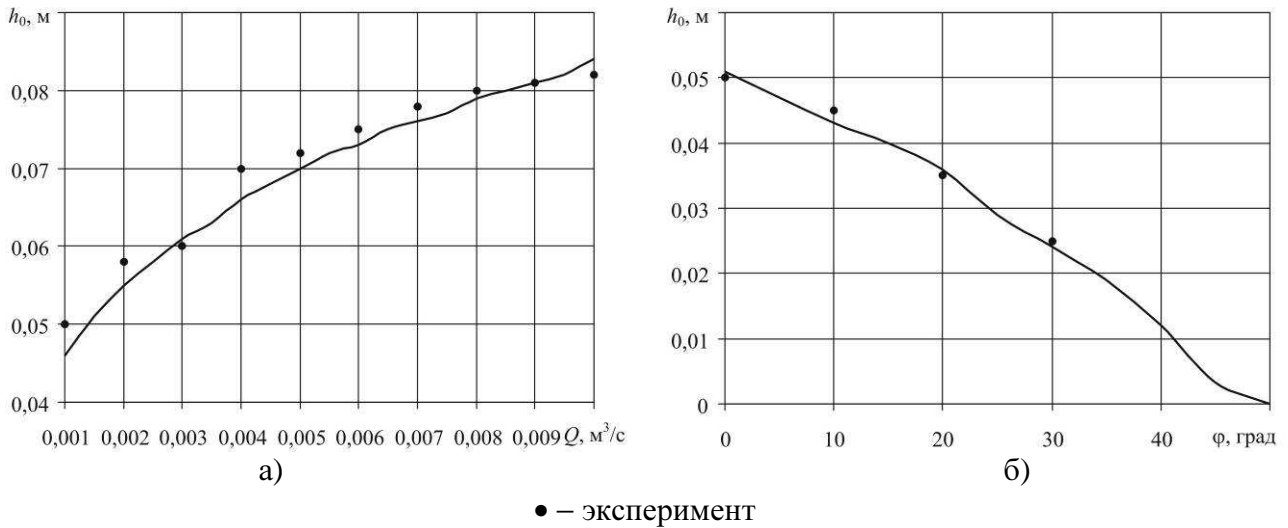


Рис. 2 – Результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом

Производительность конвейера при изменении угла наклона щита равнялась $Q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 2,б).

Из рис. 2,а,б следует, что с увеличением производительности конвейера высота подпорного клина увеличивается, а с увеличением угла наклона отбойного щита высота подпорного клина уменьшается. При этом экспериментальные значения хорошо совпадают с теоретическими кривыми.

Следовательно, разработана адекватная математическая модель взаимодействия потока насыпного груза с отбойным щитом.

Эта модель позволяет в зависимости свойств насыпного груза, параметров конвейера, конструктивных параметров отбойного щита и его веса определить параметры подпорного клина (высоту h_0 , длину l_0), а также силу, действующую на отбойный щит со стороны потока насыпного груза.

Кроме того, найдены условия, при которых происходит завал на отбойном щите.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сакович В.М., Кукса В.П. Движение груза в пересыпных устройствах ленточных конвейеров // Горные, строительные и дорожные машины. - К.: Техніка, 1968. - Вып.7. - С. 78-86.
2. Коваленко В.Я. Исследование процесса загрузки ленточных конвейеров, работающих на рудных предприятиях: Дис. канд. техн. наук., Днепропетровск, 1971.
3. Korzen Z. Auswirkung von Prallwänden auf den Materialabwurf bei Curtforderern // Autberiet. - Techn. - 1980. - Vol. 21. №II. - P. 552-557.
4. Кирия Р.В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Вісник Дніпропетровського університету: Механіка. - Днепропетровск, ДГУ, 1999. - Вып.2. - С. 143-150.
5. Зенков Р.Л. Механика насыпных сред. - М.: Машиностроение, 1964. - 252 с.
6. Константинов Ю.М. Гидравлика. - К.: Вища школа, 1981. - 359 с.
7. Новиков Е.Е., Смирнов В.К. Теория ленточных конвейеров для крупнокусковых горных пород. - Киев: Наук. думка, 1983. - 181 с.