

УДК 677.021.178.2:004-9

**ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ШАХТЕ БУНКЕРНЫХ ПИТАТЕЛЕЙ**

**MATHEMATICAL MODELLING OF THE PROCESS
OF DUST REMOVAL OF FIBER MASS
IN A HOPPER FEEDER COLUMN**

Т.Я. КРАСИК, А.Г. ХОСРОВЯН, Г.А. ХОСРОВЯН
T.JA. KRASIK, A.G. HOSROVJAN, G.A. HOSROVJAN

(Ивановская государственная текстильная академия)
(Ivanovo State Textile Academy)
E-mail: ttp@igta.ru

Рассматривается движение волокнистой массы в бункере под действием аспирационной системы. Выполнено исследование влияния аэродинамических сил на сжатие волокон. Принято во внимание присутствие отрицательного градиента давления в зоне действия аспирационного устройства. В предположении упругих свойств волокнистой массы выведено дифференциальное уравнение в качестве основной математической модели процесса.

Fiber mass movement in the hopper under the influence of an aspiration system is considered. Research of the influence of aerodynamic forces on the fibers compression has been carried out. Presence of an accelerating pressure gradient at the aspiration device coverage has been taken into account. The differential equation as the basic mathematical model of the process has been deduced under assumption of elastic properties of fiber mass.

Ключевые слова: волокно, бункерный питатель, аэродинамическая сила, сжатие волокон, аспирация.

Keywords: a fiber, a hopper feeder, aerodynamic force, fibers compression, an aspiration.

Анализ литературных источников показал, что известная теория движения волокнистой массы в шахте бункера не учи-

тывает действия аэродинамических сил на волокна, находящиеся в верхних слоях бункера, где происходит обеспыливание. В

работе предложена уточненная на основе законов механики и аэродинамики общая теория движения волокнистой массы в шахте бункерных питателей.

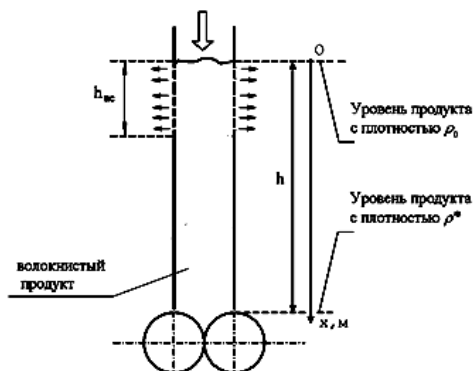


Рис. 1

На рис. 1 представлена схема бункерного питателя с аспирационным обеспыливающим устройством. В него поступает засоренный волокнистый продукт. Обозначим высоту заполнения шахты h . Примем, что расстояние между передней и задней стенками бункера равно a , ширина бункера — b . Направим систему координат Ox вдоль ребра бункера в направлении, противоположном действию силы тяжести (рис. 1). Примем, что точка O — начало координат — расположена на верхней горизонтальной грани столба волокнистого продукта. Обозначим плотность волокнистого продукта через ρ , плотность волокнистой составляющей продукта через ρ_v , а величину засоренности волокнистого продукта в долях единицы (отношение массы сора к общей массе продукта в данном объеме) — через y_3 . Отношение массы волокнистой составляющей продукта к общей массе продукта в данном объеме обозначим через $y_v = 1 - y_3$.

Воздушно-волокнистая смесь подается в шахту при помощи вентилятора. Воздушный поток проникает в верхнюю часть волокнистого столба и, захватывая пыль, через боковые отверстия отсасывается аспирационной системой. Высоту, на которой расположены отверстия аспирационной системы, обозначим через $h_{ас}$. Пусть среднее давление воздуха в сечении x равно p . Обозначим давление воздуха, изме-

ренное непосредственно над столбом волокнистой массы в бункере, через p_0 , а давление воздуха, измеренное на расстоянии $h_{ас}$, через $p_{ас}$. Так как имеет место всасывание воздуха через щели в стенках бункера, то $p_0 > p_{ас}$. Обозначим этот перепад давления через $\Delta p_{ас}$:

$$\Delta p_{ас} = p_0 - p_{ас}.$$

Когда нет проникновения потоков воздуха в волокнистые слои продукта в бункере, силы веса и трения, а также упругие свойства волокон играют определяющую роль в процессе сжатия волокон. При движении воздушной среды в волокнистых слоях в бункере в условиях отрицательного градиента давления картина сжатия волокнистых слоев значительно усложняется. К перечисленным силам добавляется аэродинамическая сила, обусловленная воздействием потоков воздуха на слои волокон. Физическая суть происходящего явления заключается в следующем. Воздушный поток, проходя горизонтальные волокнистые слои в бункере, преодолевает сопротивление волокон. Возникают аэродинамические силы, действующие со стороны воздушного потока на эти слои. Происходит сжатие слоев волокнистого продукта аэродинамическими силами. В результате этого сжатия происходит изменение аэродинамических характеристик слоя. Таким образом, при решении задачи необходимо связать вместе две модели: во-первых, модель движения продукта в шахте питателя и, во-вторых, модель движения всасываемого воздуха через слои волокон.

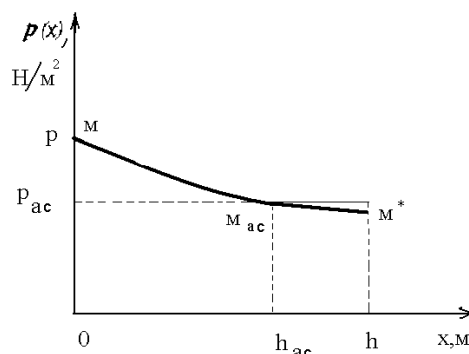


Рис. 2

Рассмотрим движение волокон на участке $0 \leq x \leq h_{ac}$. На рис. 2 показана схема распределения давления воздуха по высоте шахты при его движении внутри волокнистой массы. Для проведения расчетов будем описывать это распределение функцией $p(x)$. При этом очевидно, что $p(0) = p_0$, $p(h_{ac}) = p_{ac}$.

Поскольку волокнистая масса находится в воздушном потоке с отрицательным градиентом давления, будем полагать, что на каждый слой действует аэродинамическая сила, которая в среднем направлена вдоль оси Ox .

Считаем, что на уровне $x = h$ давление воздуха равно $p^* = p(h)$. Полагаем, что на участке $h_{ac} \leq x \leq h$ давление воздуха изменится незначительно, поскольку слой волокон достаточно сжат и ему присуще в данном случае значительное аэродинамическое сопротивление, а скорость воздуха сквозь этот слой весьма мала.

Будем считать, что сорные примеси равномерно распределяются в волокнистой составляющей смеси в бункере. Понятно, что только волокнистая составляющая смеси способна упруго отвечать на внешние механические воздействия. Полагаем, что в интервале исследуемых параметров технологического процесса влиянием сорной составляющей смеси на упругость волокнистого продукта можно пренебречь.

Выделим в волокнистом столбе горизонтальное сечение, которое проходит через точку x . Обозначим площадь сечения волокнистого столба в бункере через S . Пусть f_{up} – сила, действующая на это сечение со стороны нижележащего столба волокон высотой $h - x$. Обозначим отношение силы реакции f_{up} к площади поперечного сечения бункера через σ :

$$\sigma = f_{up} / S.$$

Полагаем, что упругие свойства волокнистого продукта описываются линейной моделью, которая учитывает изменение его плотности при изменении давления σ :

$$\rho_B = k \sigma / g + \rho_{BH},$$

где g – ускорение свободного падения; k – коэффициент сжимаемости волокнистого продукта; ρ_{BH} – плотность волокнистой составляющей продукта при $\sigma = 0$.

Доля сорных примесей в напряженном и в ненапряженном состояниях будет одинакова. Между ρ и ρ_B существует следующая взаимосвязь:

$$\rho = \rho_B / (1 - y_3) = \rho_B / y_B.$$

Следовательно,

$$\rho = (k\sigma / g + \rho_B) / y_B.$$

Выделим элементарный объем в виде параллелепипеда в столбе волокнистого продукта высотой dx на расстоянии x (рис. 3 – схема расположения тонкого горизонтального слоя продукта в шахте бункера).

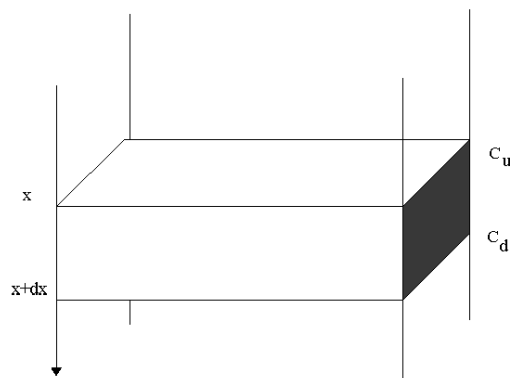


Рис. 3

Обозначим верхнюю грань этого параллелепипеда через C_u , а нижнюю – через C_d . Масса волокнистого продукта в этом элементе равна $dm = abdx$.

Выделенный элемент столба волокон подвергается действию силы притяжения, проекция которой на ось Ox равна:

$$dP = g\rho abdx.$$

На грань C_u в направлении оси Ox оказывает воздействие верхний столб смеси с силой, проекция которой на ось Ox равна:

$$f_u = \sigma(x)ab.$$

На грань C_d со стороны нижних слоев волокна действует давление, направленное вверх, и проекция на ось Ox силы, возникающей при этом, равна:

$$f_d = -\sigma(x+dx)ab.$$

Тогда можно записать, что на элемент столба действует суммарная сила df , проекция которой на ось Ox равна:

$$df_\sigma = (f_u + f_d)ab = [-\sigma(x+dx) + \sigma(x)]ab.$$

Обозначим

$$d\sigma = \sigma(x+dx) - \sigma(x).$$

Тогда

$$df_\sigma = -ab d\sigma.$$

Вдоль боковых граней выделенного параллелепипеда действуют силы нормального давления и трения. Обозначим величину силы трения, действующую на элемент через $df_{тр}$. Давление на боковые стенки σ_n линейно зависит от величины σ :

$$\sigma_n = \mu \sigma,$$

где μ – коэффициент поперечного распора (отношение давления волокнистого продукта на стенки бункера к давлению, сжимающему слой в вертикальном направлении).

Согласно закону Кулона-Амонтона величина силы трения равна:

$$df_{тр} = -k_{тр} \Pi \sigma_n dx,$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения волокнистого продукта о стенки бункера; $\Pi = 2(a+b)$ – периметр горизонтального сечения шахты бункера.

Из вышеприведенных формул следует, что

$$df_{тр} = -2\mu k_{тр} (a+b)\sigma dx.$$

Кроме вышеперечисленных сил на волокнистый слой между сечениями C_u и C_d действует аэродинамическая сила df_a . Она направлена вдоль оси Ox .

В соответствии со вторым законом Ньютона можно следующим образом записать уравнение движения элемента столба волокон:

$$dm \frac{d^2x}{dt^2} = dP + df_\sigma + df_{тр} + df_a.$$

Полученное уравнение движения волокнистой массы в бункере отличается от ранее известных тем, что в него включена аэродинамическая сила воздействия потока воздуха на волокна в шахте питателя. Отметим, что согласно законам аэродинамики [3] на участке dx разность давлений dp обуславливает усилие $df_p = -Sdp$, направленное на преодоление, во-первых, силы сопротивления со стороны волокон df_a и, во-вторых, силы сопротивления движению воздуха со стороны стенок бункера $df_{ст}$, то есть

$$df_p = df_a + df_{ст}.$$

Отметим, что соприкосновение волокон со стенками бункера носит хаотический характер. В результате этого воздушный поток непосредственно вдоль стенки развивается на тех коротких микроучастках, где волокна не контактируют со стенкой. В данном случае невозможно провести аналогию с течением воздуха в поллой трубе прямоугольного сечения. Потери давления в воздушном потоке на стенках бункера несоизмеримо меньше потерь давления, обусловленных аэродинамическим сопротивлением волокон:

$$df_a \gg df_{ст}.$$

И, следовательно:

$$df_a = df_p = -abd\rho.$$

Таким образом, имеем:

$$\rho abdx \frac{d^2x}{dt^2} = \rho gabdx - abd\sigma - 2\mu k_{\text{тр}}(a+b)\sigma dx - abd\rho.$$

Обозначим:

$$\lambda = \frac{2\mu k_{\text{тр}}(a+b)}{ab};$$

$$M = \lambda - y_b^{-1}k; N(x) = y_b^{-1}\rho_b g - p'(x).$$

Тогда, пренебрегая ускорением элемента слоя, получаем следующее дифференциальное соотношение:

$$\frac{d\sigma}{dx} = -M\sigma + N(x).$$

Полученное уравнение является базой для моделирования механических процессов в бункерном питателе, так как при выводе уравнения было принято во внимание аэродинамическое воздействие обеспыливающего аспирационного устройства на волокнистый материал. Кроме этого, следует отметить, что в случае отсутствия аспирационной системы базовое соотношение

также моделирует процесс, только в этом случае необходимо принять:

$$p'(x) = 0.$$

ВЫВОДЫ

На основании законов механики и аэродинамики получено универсальное дифференциальное соотношение, устанавливающее закономерности изменения плотности волокнистого материала в шахте бункера питателя в зависимости от механических характеристик волокнистого материала, размеров бункерного питателя и распределения давления воздуха в шахте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мкртумян А.С., Хосровян А.Г., Красик Я.М., Хосровян Г.А. Методика расчета высоты столба засоренной волокнистой смеси в шахте бункерного питателя // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, №2
2. Мкртумян А.С., Хосровян А.Г., Красик Я.М. Аналитическая зависимость для расчета распределения плотности волокнистого продукта по высоте бункера // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, №6С
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973.

Рекомендована кафедрой технологии машиностроительного производства. Поступила 29.11.10.