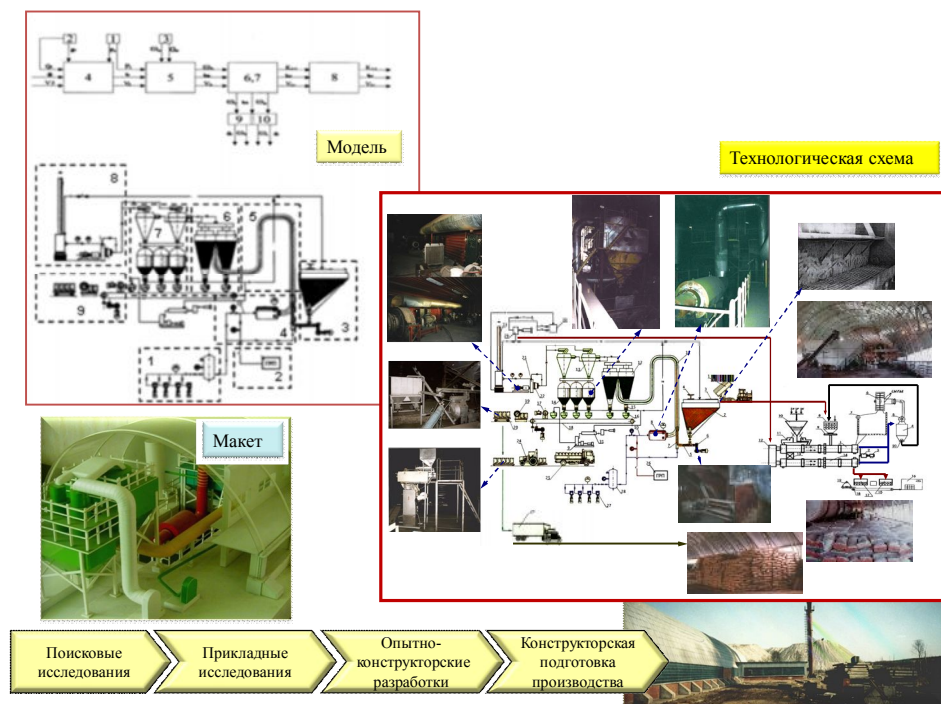


## Внедрение малоотходных, ресурсосберегающих технологий – основа рационального природопользования

**Щеткин Б.Н.**

Сельское хозяйство является не только базовой отраслью народного хозяйства, оно еще является и одним из сильных источников отрицательного воздействия на окружающую среду. Современные птицефабрики завалены (большой частью) птичьим пометом, который, по мере его утилизации, является прекрасным органическим удобрением. Одним из наиболее рентабельных методов утилизации птичьего помета является его сушка (рис. 1). Пометные удобрения многофункциональны по своему влиянию на плодородие почв, внесение их оказывает существенное воздействие практически на все почвенные свойства и режимы. Сушеный птичий помет, являясь высококонцентрированным органоминеральным удобрением, оказывает влияние не только на урожайность сельскохозяйственных культур, но и на элементы плодородия почв<sup>1</sup>.



*Рис. 1. Схема последовательности разработки пневмотермической сушилки*

Основой расчета труб-сушилок (пневмотермической сушилки) является определение минимально необходимой скорости сушильного агента, обеспечивающей вертикальное движение частиц высушиваемого материала<sup>2</sup>.

В отличие от процесса сушки в установках с движущимся слоем дисперсного материала, где относительная скорость движения потоков сушильного агента и материала в известных пределах (от нуля до критической скорости начала псевдооживления) может быть установлена независимо от всех других параметров, здесь, наоборот, скорость сушильного агента должна быть непременно выше некоторого значения, эта оптимальная скорость сравнительно просто определяется в случае одиночной сферической частицы, находящейся в восходящем однородном потоке газа (рис.2).

Баланс основных сил тяжести и гидродинамического сопротивления, действующих на такую частицу, может быть записан следующим образом:

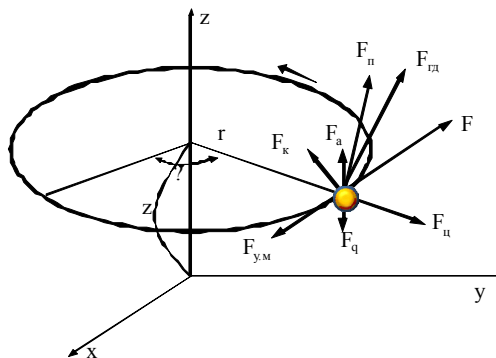
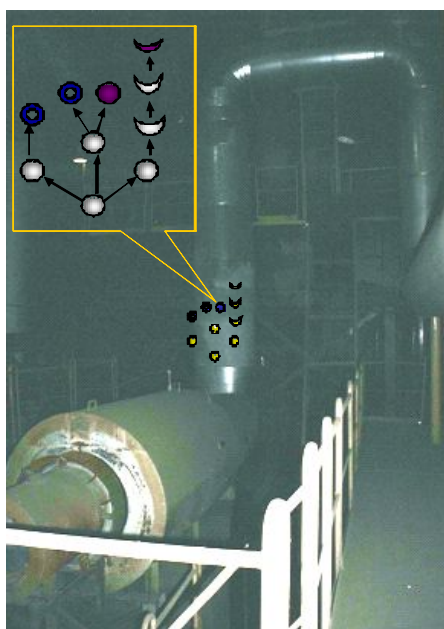
$$d(mv)/dt = mg - \xi \left( \pi d^2 / 4 \right) \rho (\omega - v)^2 / 2 \quad (1)$$

где  $\xi$  - коэффициент гидродинамического сопротивления при обтекании сферической частицы, зависящий от критерия  $Re$ , в которой вводится относительная скорость газа и частицы  $\omega - v$ .

Как известно, состояние витания частицы соответствует нулевому значению ее ускорения, что дает простое соотношение для скорости витания  $\omega_v$ ,

$$\omega_v = \sqrt{4/3g(\rho_T - \rho)d / (\rho\xi)} \quad (2)$$

которое, однако, не слишком удобно для практических расчетов, поскольку коэффициентов сопротивления также зависит от искомой скорости, а явный вид этой зависимости неодинаков для различных диапазонов  $Re$ .



- Схема действия сил на частицу при движении в закрученном потоке газа:
- Центробежная  $F_{гц}$ ;
- Гидродинамического сопротивления  $F_{гд}$ ;
- Тяжести  $F_g$ ;
- Переносная Кориолиса  $F_{гк}$ ;
- Поперечная Магнуса-Жуковского  $F_{гм-ж}$ ; подъемная Архимеда  $F_a$ .

Рис. 2. Схема движения одиночной сферической частицы в восходящем потоке газа (сушильного агента) и действия сил на частицу.

Удобные графики для определения скорости витания одиночных частиц сферической и несферической формы, построены в координатах  $L_y = f(A_r)$ , учитывают экспериментальные данные о явной зависимости  $\xi = \xi(R)$  для различных диапазонов  $Re$ . Для сферических частиц можно использовать аппроксимационное соотношение:

$$\omega_v d / v = Ar / (18 + 0,6\sqrt{Ar}) \quad (3)$$

где:  $Ar = (gd^3v^2)(\rho_T - \rho) / \rho$ ;  $L_y = \omega_v^3 \rho / [v(\rho_T - \rho)g]$

Соотношение (3) справедливо лишь для случая, когда концентрация дисперсного материала в потоке сушильного агента достаточно мала, чтобы можно пренебречь влиянием соседних частиц на значение коэффициента гидродинамического сопротивления. Согласно опытным данным, предельная концентрация, при которой нельзя пренебрегать взаимным влиянием частиц при вычислении скорости витания, соответствует объемной концентрации дисперсного материала в потоке  $\beta_{об} \approx 0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . В этом случае для вычисления скорости витания может быть использовано соотношение (3), в которое вводится объемная концентрация дисперсного материала:

$$\omega_v d / v = Ar(1 - \beta_{об})^{4,75} / \left[ 18 + 0,06\sqrt{Ar(1 - \beta_{об})^{4,75}} \right] \quad (4)$$

В уравнении (4) скорость витания соответствует скорости газа в расчете на полное поперечное сечение трубы-сушилки.

Приведенные простые формулы, однако, не учитывают значительного числа факторов, которые могут практически влиять на величину необходимой скорости газа, обеспечивающей надежное движение материала вверх по трубе-сушилке (см. рис. 2):

столкновение частиц друг с другом, столкновение частиц со стенкой трубы, вращение частиц (особенно неправильной формы), влияние турбулентных пульсаций потока сушильного агента и обратное влияние дисперсной твердой фазы на структуру газового потока, возможное агрегирование мелких частиц и т.п.

Учет перечисленных факторов в полном объеме в настоящее время не представляется возможным.

Для нахождения значения рабочей скорости газа рекомендуется использовать коэффициент по отношению к скорости витания частиц, равной 1,6...1,7; для труб-сушилок большого диаметра коэффициент запаса должен быть несколько больше (1,9...2,0), а в случае мелких частиц, склонных к агрегированию, коэффициент запаса скорости восходящего потока газа может принимать еще большие значения.

Рабочая скорость газа  $\omega$  может зависеть также от неравномерности распределения частиц материала по сечению трубы значительного диаметра, что в свою очередь связано с работой забрасывателя материала.

В связи с отмеченными осложняющими обстоятельствами определение рабочей скорости вертикального потока газа наиболее надежно можно производить на основе рекомендаций, полученных из экспериментальных данных для конкретных дисперсных материалов.

Корреляционные соотношения для расчета, так называемого коэффициента скольжения, т.е. отношения рабочей скорости газа к скорости частиц ( $\omega/v$ ), предложены в специальной литературе по пневмотранспорту. Для оценочных расчетов в первом приближении, возможно, полагать, что разность вертикальных скоростей газа и частиц материала равна скорости витания частиц в пределах гидродинамического стабилизированного участка, на котором частицы уже приобрели постоянную скорость.

Участок гидродинамической стабилизации следует за разгонным участком, в пределах которого скорость частиц возрастает от практически нулевого значения в точке ввода материала до постоянного значения, меньшего скорости газа на величину витания. В начальном сечении, где скорость частиц равна нулю, относительная скорость газа достаточно велика, обычно в трубах-сушилках рабочие скорости сушильного агента равны  $\omega=15...30$  м/с, что приводит к большой силе гидродинамического сопротивления, действующей на частицу со стороны потока газа.

Под действием этой силы мелкие частицы с малой массой быстро ускоряются и на высоте порядка 1.0 м могут уже приобрести стационарное значение скорости иначе складывается ситуация для крупных частиц масса которых велика. Гидродинамические расчеты показывают, что для таких частиц (диаметром 3-5мм) сила сопротивления не настолько превышает силу тяжести, как для мелких частиц, поэтому длина разгонного участка может достигать 10 м и более. Таким образом, значительная часть общей высоты трубы-сушилки для частиц крупной фракции может представлять собой разгонный участок, на котором скорость самих частиц и скорость скольжения ( $\omega-v$ ) переменны и уменьшаются по мере подъема.

Поведение дисперсного материала в вертикальной трубе-сушилке, особенно на разгонном участке, значительно отличается от движения сплошного потока частиц в движущемся фильтруемом слое. Действительно, увеличение скорости разгоняющихся частиц приводит к соответствующему уменьшению концентрации твердой фазы и сокращению времени пребывания частиц на каждом из последующих участков вертикальной трубы-сушилки.

При малых объемных концентрациях твердой фазы частицы мелкой и крупной фракции движутся, не зависимо друг от друга, при этом мелкие частицы быстро разгоняются в потоке газа и перемещаются вверх с относительно высокой скоростью, отличающейся на участке гидродинамической стабилизации от скорости газа на сравнительно не большую для малых частиц величину скорости витания. Крупные частицы разгоняются значительно медленнее, а скорость их движения на стабилизированном участке отличается от вертикальной скорости газа на большую величину скорости витания крупных частиц.

Сравнительно медленное движение частиц крупной фракции приводит к тому, что время их пребывания оказывается большим, чем время пребывания мелких фракций.

Существенных эффектов для полидисперсного материала при значительной его концентрации является относительно быстрый разгон мелких фракций, которые при этом догоняют медленно разгоняющиеся крупные частицы и передают им дополнительный вертикальный импульс.

Мелкие частицы вследствие соударения с крупными теряют часть вертикальной скорости, но в промежутках между последовательными соударениями вновь быстро ускоряются. Таким образом, происходит перераспределение скорости частиц. Увеличение скорости крупных фракций оказывается несколько большим, чем уменьшение скорости мелкой фракции. Соответственно суммарная длина разгонного участка для крупной фракции несколько сокращается, а для мелкой удлиняется. За счет взаимных соударений изменяются также и время пребывания частиц крупной и мелкой фракции в трубе-сушилке, причем с точки зрения равномерности сушки частиц это изменение не является благоприятным, поскольку пребывание крупной фракции уменьшается, а время пребывания мелких фракций, наоборот увеличивается (рис. 3).

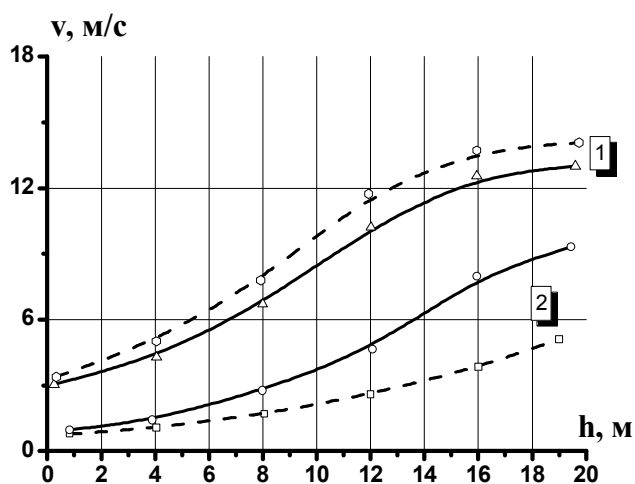


Рис. 3. Изменение скоростей частиц различного размера по высоте трубы. Сплошные линии - с учетом столкновений, пунктирные - без учета; 1-  $d=5$  мм; 2 -  $d=0,5$  мм.

На высоте около 10 м крупные частицы даже при «подгонке» мелкими все еще не выходят на гидродинамический стабилизированный участок. Высота разгонного участка для мелкой фракции в результате столкновений с крупными частицами также становится значительно больше.

Помимо сил взаимных столкновений еще одной силой, действующей на частицы дисперсного материала, является сила воздействия стенки вертикальной трубы. Наличие поперечной составляющей скорости частиц приводит к их столкновению со стенкой, при этом частицы теряют часть вертикального импульса и, таким образом, испытывают некоторое тормозящее воздействие со стороны стенки.

Перепад давления в двухфазном потоке, обусловленный ударами частиц о стенку:

$$\Delta p_T = K_T \mu \Delta p_{TP}$$

Здесь  $\Delta p_{mp} = \lambda_{mp} (H/D) \rho \bar{w}^2 / 2$  - перепад давления в трубе высотой  $H$  и диаметром  $D$  при движении потока газа, не содержащего твердую фазу;  $\mu$  - расходная массовая концентрация твердой фазы. Коэффициент  $K_T$  зависит от состояния поверхностей стенки и частиц, упругих свойств материала и стенки, величины поперечной составляющей скорости частиц. Имеющиеся в литературе теоретические формулы и экспериментальные корреляционные соотношения приводят к оценочным величинам для коэффициента  $K_T$  в диапазоне от 0,4 до 1,2.

Анализ показывает, что основная причина вращения частиц в двухфазном потоке связана с их соударениями о стенку трубы или частицами более крупной фракции. Быстрее вращаются мелкие частицы неправильной формы. Вращение в основном происходит вокруг горизонтальной или слабо наклонной к горизонту оси, при этом возникают силы Магнуса,

которые в свою очередь влияют на формирование профиля концентрации твердой фазы в поперечном сечении потока.

Однако силы Магнуса и электростатические силы обычно незначительно влияют на вертикальное движение частиц твердой фазы, а вовлечение частиц мелкой фракции в пульсационное движение сушильного агента приводит к некоторому возрастанию интенсивности внешней тепло и масса отдачи.

Наиболее общим уравнением ускоренного движения полудисперсного материала в настоящее время может считаться следующее соотношение полного ускорения частицы  $i$ -й фракции под действием силы гидродинамического сопротивления, силы тяжести, эффективной силы столкновения с частицами других фракций и эффективной силы трения частиц о стенку трубы:

$$\rho_T \left[ v_i^2 \frac{du_i}{dh} + (1+u_i)v_i \frac{dv_i}{dh} \right] = \frac{3}{4} \frac{\xi_i \rho}{d_i} (\omega - v_i) |\omega - v_i| - g - \frac{3}{4} \rho \omega \sum_{j=i}^N E_{ji} (1 + K_{nji}) \frac{\mu_i (d_i + d_j)^2}{\rho_i d_i^3 + \rho_j d_j^3} \frac{v_j - v_i}{v_j} |v_j - v_i| + K_r \frac{\pi \lambda_{TP} \rho}{12D} \cdot \omega^2 \sum_i \frac{\omega_i}{d_i^3} \quad (5)$$

где  $\omega_i$  и  $u_i$  – массовая доля и влагосодержание частиц  $i$ -й фракций.

Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц  $i$ -й фракции  $\xi_i$  обычно рассматривается как функция критерия  $Re_i$  коэффициента формы частицы  $f_{\Phi_i}$ , принимаемого равным отношению поверхности частицы к поверхности равновеликого по объему шара. В ряде научных источников приводятся значения коэффициентов формы для значительного числа различных материалов. Там же имеются экспериментальные данные по величинам коэффициентов сопротивления частиц. Так, для частиц с усредненным значением коэффициента формы  $f_i = 1,15$  могут быть использованы следующие данные:

$$\xi = \begin{cases} 25,3 Re^{-1} + 5,25 Re^{-1/3} - 0,565 Re^{-1/2} \text{ нпу } Re < 80 \\ 3,54 Re^{-0,2} \text{ нпу } 80 \leq Re \leq 345 \\ 1,1 \text{ нпу } Re > 345 \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициент осаждения  $E_{ji}$  равен вероятности столкновения частиц, имеющих диаметры  $d_i$  при  $d_j$ . В предельных случаях вязкого (индекс « $v$ ») и потенциального (индекс « $\rho$ ») обтекания частиц (т.е. при  $Re \rightarrow 0$  и  $Re \rightarrow \infty$ , соответственно) величины  $E_{ji}^v$  и  $E_{ji}^\rho$  можно определить в зависимости от величины критерия Стокса  $Stk = \rho_j d_j^2 |v_j - v_i| / (18\eta d_i)$  по следующим приближенным соотношениям.

$$E_{ji}^v = \left[ 1 + \frac{0,75 \ln(4Stk_{ji})}{2Stk_{ji} - 1,214} \right]^{-1} \text{ нпу } Stk > 0,607 \text{ и } 0 \text{ нпу } Stk \leq 0,607$$

$$E_{ji}^\rho = [Stk_{ji} / (Stk_{ji} + 0,125)]^2$$

Для промежуточных значений  $Re_i$  коэффициент осаждения можно приблизительно вычислять путем интерполяции значения, полученных для вязкого и потенциального режимов обтекания.

$$E_{ji} = (Re_i E_{ji}^\rho + 60 E_{ji}^v) / (Re_i + 60)$$

Значение коэффициентов  $k_n$  восстановления нормальных составляющих скорости частиц при их взаимных соударениях могут быть определены экспериментально для частиц каждого конкретного материала, по методике описанной Г.Л.Бабухом и др<sup>3</sup>.

В общем случае численные значения  $k_n$  могут быть различными в зависимости от температуры  $\theta$  и влагосодержания материала, при этом по мере повышения температуры  $k_n$  уменьшается.

Последнее слагаемое уравнения (5) соответствует некоторой эффективности средней силы, действующей на каждую частицу в результате соударений со стенкой трубы. Выражение для силы трения получается из известного соотношения для потери давлений вследствие столкновений частиц со стенкой при прохождении двухфазного потока по трубопроводу.

$$\Delta p_T = K_r \mu \lambda_{TP} (\Delta h / D) \rho \omega^2 / 2 \quad (7)$$

где  $\Delta p_T$  – потери давления на трение потока сушильного агента без твердой фазы на участке высотой  $\Delta h$  в трубе диаметром  $D$ ; значение коэффициента  $K_r$ , для некоторых материалов приводится в специальной литературе.

Мощность, теряемая в трубе вследствие соударений частиц о стенки:

$$\Delta N = \Delta p_T \omega \pi D^2 / 4 \quad (8)$$

Эта же мощность может быть выражена через искомую силу трения частицы о стенку и продольную составляющую скорости:

$$\Delta N = F_T \sum_i (v_i n_i \Delta h \pi D^2 / 4) \quad (9)$$

где  $n_i$  – счетная концентрация частиц  $i$ -й фракций на участке  $\Delta h$

Из двух последних соотношений может быть получено выражение относительно одинаковой для всех частиц эффективной силы трения:

$$F_T = K_r \mu \lambda_{TP} \rho \omega^3 / \left[ 2D \sum_i (v_i n_i) \right] \quad (10)$$

Число частиц  $i$ -й фракции в объеме  $\Delta h \pi D^2 / 4$  выражается через массовый расход твердой фазы  $M_T$  долю  $i$ -й фракции  $\omega_i$  и время пребывания  $i$ -й фракции на участке высоты  $\Delta h$ , равное  $\Delta h / v_i$

$$n_i = 24 M_T \omega_i (\Delta h / v_i) / (\pi d_i^3 \rho_T \Delta h \pi D^2) \quad (11)$$

Подстановка соотношения для  $n_i$  и расходной концентрации  $\mu = M_T / G$  в равенство (10) приводит к выражению, соответствующему последнему слагаемому уравнения (5).

При сушке материалов в трубах-сушилках ввиду незначительной величины времени пребывания частиц в зоне термообработки приходится увеличивать высоту сушилки или организовывать процесс сушки за счет установки в трубе специальных вставок (сифоны), замедляющих движение частиц материала и турбулизирующих поток сушильного агента.

<sup>1</sup> Щеткин Б.Н. Птичий помет и технологии его переработки в высокоэффективные удобрения. -Санкт-Петербург: Издательство СПбГАУ, 2000.-256с

<sup>2</sup> Самойлович Г.С. Гидродинамика. -М.: Машиностроение, 1990.-384с.

<sup>3</sup> Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках. -Киев: Наукова думка, 1972.-174с.