

УДК 622.641.033

А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАСЫПКИ КУСКОВОГО ТОРФА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

На примере цилиндрической модели рассмотрены изменения насыпной плотности засыпки кускового торфа в постоянный минимальный объем в зависимости от отношения поочередно меняющихся их длины и диаметра. Сравнение производится со сферической формой куска через изменение объемов тел, вероятности наличия дефектов, плотности частиц, их концентрации в постоянном объеме, коэффициентов неоднородности и разрыхления.

Ключевые слова: насыпная плотность, форма куска, дефекты структуры, оптимизация засыпки.

Засыпка любой продукции цилиндрической формы (торф, уголь, дрова, сельскохозяйственная продукция, лекарственные препараты, монеты, и др.) требует минимизации объема V . На примере цилиндрической модели, рассмотрим изменение плотности засыпки кусков $\gamma_{\text{нас}}$ в постоянный объем $V = \text{const}$. В качестве технологической характеристики для кусков торфа, выбирается соотношение длины ℓ к диаметру d . В торфяной отрасли для мелкокускового торфа — это соотношение выбирается $\ell_i = (1.5 - 2.0)d_i$ при формовании торфа методом экструзии. При длине ℓ_i происходит обламывание цилиндрического куска под действием поля сил тяжести. В случае выстилки кусков непосредственно на поле сушки длина и диаметр задаются технологическими условиями формования и требованиями потребителя.

Поэтому представляет интерес установить зависимость насыпной плотности $\gamma_{\text{нас}}$ готовой продукции от соотношения длины ℓ_i к диаметру куска d_i ,

$$\gamma_{\text{нас}} = f\left(\frac{\ell_i}{d_i}\right) = f(x_i), \quad (1)$$

где $x_i = \left(\frac{\ell_i}{d_i}\right)$. Последняя позволяет

оптимизировать размеры продукции при максимальном использовании объема V упаковки (загрузки). Насыпная плотность характеризует массу торфа m_T кг в занимаемом объеме $V \text{ м}^3$,

$$\gamma_{\text{нас}} = \frac{m_T}{V}, \quad (2)$$

где $m_T = m_{\text{ч}} \cdot n_{\text{ч}} = \ell_r \gamma_{\text{ч}} n_{\text{ч}} \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4}$,

$\frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \ell_{\text{ч}} = V_{\text{ч}}$ — объем одной частицы массой $m_{\text{ч}}$ и плотностью $\gamma_{\text{ч}}$. Подставим m_T в уравнение (2) и получим, что

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{нас}} &= \frac{V_{\text{ч}}}{V} \gamma_{\text{ч}} n_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4V} \ell_{\text{ч}} \gamma_{\text{ч}} n_{\text{ч}} = \\ &= V_{\text{ч}} \gamma_{\text{ч}} C. \end{aligned} \quad (3)$$

То есть $\gamma_{\text{нас}}$ пропорциональна объему частицы $V_{\text{ч}}$, её плотности $\gamma_{\text{ч}}$ и

концентрации частиц C в объеме загрузки V , $C = \frac{n_q}{V} \left(\frac{\text{ед.}}{\text{м}^3} \right)$.

В этой связи рассмотрение функции (1) вызывает затруднение, т.к. при $\ell_i \rightarrow 0$, $\gamma_{\text{нас}} \rightarrow 0$ при любых значениях d_i и n_q . С ростом ℓ_i , d_i и n_q плотность растёт, причем в большей степени от диаметра кусков ($\sim d^2$) при мало изменяющейся концентрации частиц n_q .

В связи с этим схема изменения насыпной плотности $\gamma_i = f \left(\frac{\ell_i}{d} \right)$ от длины ℓ_i куска [$n(n_q \text{ и } d) = \text{const}$] выражается кривой 1 (рис. 1), а зависимость $\gamma_i = f \left(\frac{\ell_i}{d} \right)$ при $(n_q \text{ и } \ell) = \text{const}$ описывается кривой 2. Нелинейность графической зависимости 1 (рис.1) вызвана изменением концентрации C при колебании размеров кусков. С увеличением ℓ_i число частиц n_q уменьшается и зависимость $\gamma_i = f \left(\frac{\ell_i}{d} \right)$ будет расти в меньшей степени по сравнению со случаем, когда $n_q = \text{const}$ (график 1). В случае графика 2 $\gamma_i = f \left(\frac{\ell}{d_i} \right)$ с ростом d_i число частиц также, как и в первом случае, уменьшается ($V = \text{const}$) и график $\gamma_i = f \left(\frac{\ell}{d_i} \right)$ выражается степенной функцией (см. формулу (3)). Поэтому тенденции (графики 1,2)

изменения $\gamma_i = f \left(\frac{\ell_i}{d_i} \right)$ будут сохра-

няться (рис. 1) при $n_q = \text{const}$. Точка пересечения кривых должна приходиться на соотношение $\frac{\ell_i}{d_i} \rightarrow 1$, т.е.

приближаться к сферической форме, соответствующей $\gamma_{\text{нас}} \rightarrow \text{max}$. Значит

при $\frac{\ell}{d} > 1$, $\gamma_{\text{нас}}$ должна убывать. Тогда функция (1) будет стремиться к экстремальной (рис. 1).

В зависимости от вида укладки: кубическая K_K или гексагональная K_G насыпная плотность будет отличаться ($\gamma_{\text{куб}} < \gamma_{\text{гек}}$), и составлять долю от плотности γ_q , т.е. для поленицы кусков

$$\gamma_G = \left(\frac{\pi \gamma_q}{4 K_G} \right) = (0.785 \frac{\gamma_q}{K_G}) \approx 0,85 \gamma_q$$

$$\text{(при } K_G = 0,925), \quad \gamma_{\text{куб}} = \left(\frac{\pi \gamma_q}{4 K_{\text{куб}}} \right) \approx$$

$\approx 0,785 \gamma_q$ (при $K_{\text{куб}} = 1.0$). Здесь K_K и K_G — коэффициенты укладки частиц. Изменение γ_i вызвано различием коэффициента разрыхления $K_{\text{раз}} [1]$, показывающего отношение плотности сухой части кусков в кладке $\gamma_{\text{скл}}$ к плотности отдельной частицы (куска) $\gamma_{\text{ск}}$,

$$K_p = \frac{\gamma_{\text{скл}}}{\gamma_{\text{ск}}} . \quad (4)$$

Последний для кускового торфа составляет $K_p = 0,45$ (верховой тип залежи) и $K_p = 0,365$ (низинный тип), который практически не зависит от сте-

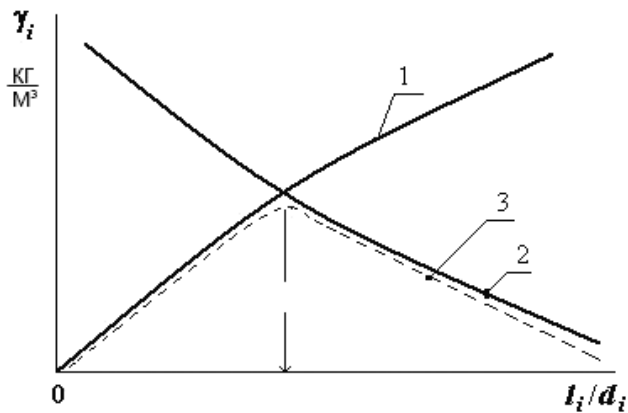


Рис. 1. Схема изменения насыщенной плотности цилиндрических кусков в зависимости от соотношения длины l_i к их диаметру d_i : 1 — при изменении l_i ($d_i = \text{const}$); 2 — при изменении d_i ($l_i = \text{const}$) и $c \cong \text{const}$

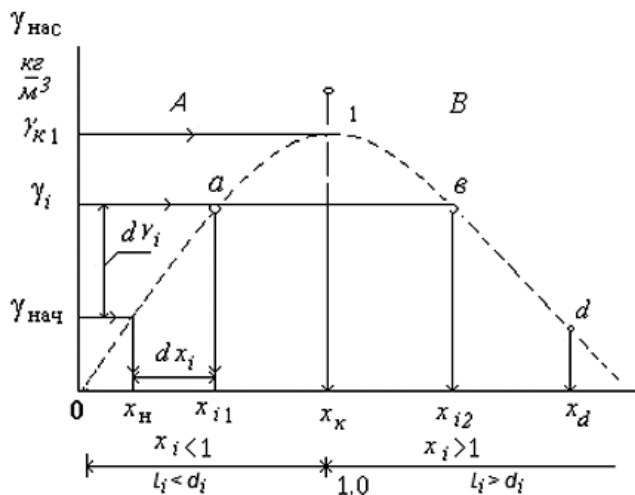


Рис. 2. Схема изменения насыщенной плотности образцов торфа цилиндрической формы в зависимости от соотношения длины l_i к их диаметру ($x_i = \frac{l_i}{d_i}$)

пени разложения торфа и изменения коэффициента усадки (соответственно $K_{yc} = 0,43 - 0,95$; $K_{yc} = 0,37 - 0,84$). Для торфяных брикетов это соотношение составляет $K_p = 0,73$, т.е. стремится к гексагональной укладке. В случае

фрезерного торфа $K_p \rightarrow 1$ из-за высокой пористости n слоя ($n \cong 0,93$) и самих частиц различной длины и средневзвешенного диаметра ($d = 3 - 5$ мм). [1, 2].

Такое разнообразие коэффициентов разрыхления слоя продукции отличается от общепринятой модельной (кубическая, гексагональная и др.) укладки частиц. Поэтому предлагаемый подход (функция 1) будет более конкретным и контролируемым в технологии производства разнообразной продукции из торфа. Для этого вынесем график 3 с рис. 1. Обозначим характерные области А, В (рис. 2) и составим дифференциальные уравнения, поочередно для области А (от нуля до максимума γ_k) и В (после максимума γ_k до заданной насыпной плотности, точка d) изменения $\gamma_i = f(dx_i)$.

Область А.

Из анализа графиков 1,3 (рис. 1) следует, что изменения плотности $d\gamma_i$ пропорционально величине γ_i и колебанию координаты dx_{i1} ,

$$d\gamma_i = \lambda_A \gamma_i dx_{i1}; \quad (5)$$

где λ_A — коэффициент

пропорциональности, смысл которого определим ниже. Из выражения (5) следует дифференциальное уравнение

$$\frac{d\gamma_i}{\gamma_i} - \lambda_A dx_{i1} = 0. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (6) выполняется при изменении плотности от γ_n до γ_i при соответствующих координатах: x_n и x_{i1} (рис. 2). Окончательно получаем,

$$\gamma_i = \gamma_n \cdot \exp[\lambda_A(x_{i1} - x_n)]. \quad (7)$$

Следовательно, при $x_n \rightarrow 0$, $\ell_n \rightarrow 0$ и плотность $\gamma_{нач}$ исходит из начала координат,

$$\gamma_i = \gamma_n \exp(\lambda_A x_{i1}). \quad (8)$$

Если разложить показательную функцию (8) в ряд и воспользоваться первыми двумя слагаемыми, то получим приближенное уравнение вида

$$\gamma_i \approx (1 + \lambda_A x_{i1}) \cdot \gamma_n, \quad (9)$$

где γ_n — начальная плотность $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$ при координате x_n .

Константа из уравнения (8) $\lambda_A = \frac{d \ln \gamma_i}{dx_{i1}}$ характеризует приращение насыпной плотности при $dx_{i1} \rightarrow 1(\ell_i \rightarrow d_i)$.

Область В.

Что касается области В (графики 2, 3, рис. 1), то она описывается подобными уравнениями (5), (6) только с отрицательным коэффициентом пропорциональности $(-\lambda_B)$, например, $d\gamma_i = -\lambda_B \gamma_i dx_{i2}$.

Пределы интегрирования принимают значения γ_k и γ_i соответственно при $x_i = x_k$ и $x_i = x_{i2}$ (рис. 2). Тогда уравнение (6) запишется в виде:

$$\int_{\gamma_k}^{\gamma_i} \frac{d\gamma_i}{\gamma_i} = -\lambda_B \int_{x_k}^{x_{i2}} dx. \quad (10)$$

После интегрирования получаем,

$$\gamma_i = \gamma_k \exp[-\lambda_B(x_{i2} - x_k)], \quad (11)$$

т.е. γ_i уменьшается с ростом x_{i2} при $(x_k, \gamma_k) = \text{const}$.

Здесь λ_B — угловой коэффициент зависимости $\ln \gamma_i = f(x_{i2})$, $\lambda_B = \frac{d \ln \gamma_i}{dx_{i2}}$ — безразмерная величина характеризующая относительное приращение насыпной плотности при $dx_{i2} \rightarrow 1(\ell_i \rightarrow d_i)$.

Приближенное уравнение, так же подобно (9) и принимает вид,

$$\gamma_i \approx (1 - \lambda_B x_{i2}) \cdot \gamma_k. \quad (12)$$

Таким образом, уравнения (7), (11); (9) и (12) позволяют описывать зависимость

$$\gamma_{нач} = f\left(x_i = \frac{\ell_i}{d_i}\right).$$

Технологическое приложение

Зададим значения плотности, например, для $\gamma_i = \gamma_1$. Этому значению γ_1 соответствуют величины x_{i1} в области А, и x_{i2} в области В. В последнем случае область ограничивается реальными пределами, устанавливаемыми потребителем продукции. Приравняем уравнение (7) и (11) и найдем выражение для максимальной насыпной плотности,

$$\gamma_k = \gamma_n \exp[\lambda_A \cdot (x_{i1} - x_n) - \lambda_B(x_{i2} - x_k)] \quad (13)$$

Следовательно, γ_k можно вычислить через изменение $\Delta x_{i1} = x_{i1} - x_n$,

$\Delta x_{i2} = x_{i2} - x_k$ при $\gamma_n > 0$. При $x_i = x_k$ уравнение (13) упрощается, пропадает второе слагаемое экспоненты и

$$\gamma_k = \gamma_n \exp [\lambda_A (x_k - x_n)] . \quad (14)$$

Если приравнять уравнения (9) и (12), то можно получить приближенное уравнение оценки максимальной γ_k насыпной плотности,

$$\gamma_k = \gamma_n \frac{(1 + \lambda_A x_{i1})}{(1 - \lambda_B x_{i2})} \quad (15)$$

Проанализируем $\gamma_{нас}$ в точках: а, к, б, д.

Анализ данных показывает увеличение длины образца при $d_i = const$ и уменьшение диаметра при $\ell_i = const$. При равенстве значений $\ell_i = d_i$ кусок приближается к сферической форме $\left(\frac{\ell_i}{d_i} \Rightarrow 1\right)$, но при этом образован-

ный ряд значений x_i имеет различную длину ℓ_i и диаметр d_i . Например, изменение $\frac{\ell_i}{d_i} = 1$ будет при

значениях: $\frac{1}{1}, \frac{2}{2}, \frac{3}{3}, \dots, \frac{10}{10}$ и т.д., опре-

деляет насыпную плотность γ_i и концентрацию S частиц при постоянном объеме V загрузки (рис. 3, 4), то есть с ростом W и уменьшением l_m и d плотность увеличивается (сравнить графики 1, 2, 3, 4) при $d_i = const$ (рис. 3) и графики 1, 2 (рис. 4) при $W_i = const$. В пределе при $W_i \rightarrow 0$ ве-

личина γ_i стремится к плотности γ_c сухого вещества,

$$\gamma_c = \frac{\gamma_i}{(1 + W_i)} . \quad (16)$$

При этом с уменьшением d плотность γ_i растет при любых $W_i = const$ (рис. 4, сравнить графики 1, 2). При $\frac{\ell_i}{d_i} \rightarrow 1$ плотность γ_k (точка к, рис. 2)

так же растет. Расчет оптимальных значений γ_k производится по формулам (13), (14) или (15).

Таким образом, увеличение $x_i > 1$ (при $\ell_i = const$) приводит к утоньшению образца, что соответствует гранулированию материала (торфяные гранулы, пеллеты, в пищевой промышленности — макаронные изделия и др. направления использования). При $x_i < 1$ значения d_i растут, что приближает цилиндрическую форму образца к дискообразной, которая встречается при производстве торфяной продукции, таблетировании медицинских порошкообразных препаратов, упаковке монет, плоских украшений и других направлениях использования. Сферические образцы ($x_i = 1$) получают методом окатывания в различных типах грануляторов (торф, уголь, керамзит и др. продукция). Причем, объем цилиндрической частицы V_q отличается от объема вписанной сферы $V_{сф}$ тем больше, чем больше его длина $\ell_q (d_q = const)$ и меньше $d_q (\ell_q = const)$, т.е. с ростом $\frac{\ell_q}{d_{сф}}$,

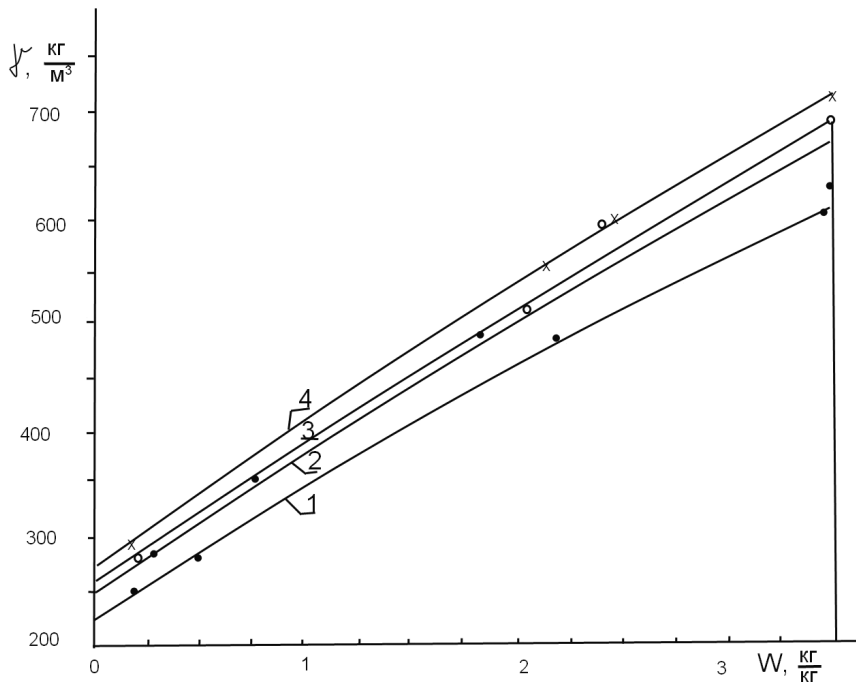


Рис. 3. Зависимость насыпной плотности γ от влагосодержания сферических частиц древесно-осокового торфа (степень разложения $R_T=30\%$) от их различных размеров d при сушке в комнатных условиях ($T = 290-296\text{ K}$, $\varphi = 0,5-0,70$): график 1, $d > 20$; 2, $d = 10-20$; 3, $d = 14-20$; 4, $d = 10-14\text{ мм}$

$$V_{\text{ч}} = \frac{3}{2} V_{\text{сф}} \frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{сф}}} \quad (17)$$

При $\frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{сф}}} \rightarrow 1$, $V_{\text{ч}} \rightarrow 1,5 V_{\text{сф}}$. Да-

лее $\frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{сф}}}$ обозначим $\frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{и}}}$. Поэтому переход к формированию сферообразных частиц не только увеличивает насыпную плотность, но и повышает прочность частиц, сокращает образование крошки из-за снижения неоднородности в распределении пор, плотности внутри частиц, влагосодержания и других дефектов структуры, при транспортировке продукции. Перечисленные преимущества можно объяснить минимумом свободной потенциальной энергии, которая и опреде-

ляет высокую устойчивость сферических частиц к внутренним перенапряжениям и внешним воздействиям.

В этой связи вероятностные процессы устойчивости цилиндрической формы частиц можно выразить относительно сферической при различных $\frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{и}}}$ частиц. Так как $V_{\text{ч}} > V_{\text{сф}}$, даже при

$\frac{\ell_{\text{ч}}}{d_{\text{и}}} = 1$, то вероятность f_i проявления

дефектов структуры, определяющих физико-механические характеристики, будет пропорциональна объему V_i частиц и в пределе стремится к минимуму дефектов сферических частиц, и тем в большей степени, чем меньше диаметр сфер, т.е.

$$f_i = \beta_i V_i \quad (i=c, i=cф).$$

Тогда отношение вероятностей f_i будет выражать относительную неоднородность $\xi_v = \frac{f_c}{f_{cф}}$ в распределении дефектов структуры, которая с учетом формулы (17) принимают вид:

$$\xi_v = \frac{f_c}{f_{cф}} = \frac{\beta_c \cdot V_c}{\beta_{cф} \cdot V_{cф}} = \frac{\beta_c}{\beta_{cф}} \frac{3}{2} \frac{\ell_c}{d_{cф}} \geq 1, \quad (18)$$

где $(\beta_c, \beta_{cф})$ - коэффициенты пропорциональности, физический смысл которых предстоит установить.

При $\xi_v \rightarrow 1$ возникает однородная структура, которая определяется величиной $\frac{\ell_i}{d_i}$ и степенью переработки

S_0 торфяной массы (S_0 - условная удельная поверхность частиц, слагающих кусок, $\frac{M^2}{кг}$), определяющей размер пор частиц, их неоднородность распределения ξ_D . Величина $\xi_D = 4,28 - 5,9$ (магелланикум торф, степень разложения $R_T = 25\%$). Величина $\xi_D = f(S_0)$ проходит через минимум при $S_0 = 580 \frac{M^2}{кг}$ [3], отвечающей максимуму прочности мелкокускового торфа цилиндрической формы ($\frac{\ell}{d} = \frac{90 \text{ мм}}{40 \text{ мм}}$). Из уравнения (18) следует, что вероятность наличия дефектов f_c , как и ξ_v ,

$$f_c = f_{cф} \cdot \frac{3}{2} \frac{\ell_c}{d_{cф}} \cdot \frac{\beta_c}{\beta_{cф}}, \quad (19)$$

растут с повышением отношения

$$\frac{\ell_i}{d_i} \text{ при } \left(\frac{\beta_c}{\beta_{cф}} \right) \rightarrow \text{const. В случае } \left(\frac{\ell_c}{d_{cф}} \right) \rightarrow 1 \quad f_c = f_{cф} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{\beta_c}{\beta_{cф}}, \text{ т.е.}$$

$f_c \neq f_{cф}$ в силу рассмотренных выше обстоятельств [см. формулу (17), рис. 2].

В этой связи насыпная плотность $\gamma_{нас}$ может быть выражена через изменение объема сферических частиц $V_{cф}$, соотношение $\frac{\ell_c}{d_{cф}}$ и $C = \frac{n_c}{V}$ с использованием формул (3) и (17), т.е.

$$\gamma_{нас} = \frac{3}{2} V_{cф} \frac{\ell_c}{d_{cф}} \cdot \gamma_c \cdot C, \quad (20)$$

или через изменение вероятности f_i наличия дефектов структуры ($f_{cф} = \beta_{cф} V_{cф}$),

$$\gamma_{нас} = \frac{3}{2} \frac{f_{cф}}{\beta_{cф}} \cdot \frac{\ell_c}{d_{cф}} \cdot \gamma_c \cdot C, \quad (21)$$

или используя формулу (3), можно получить, что

$$\gamma_{нас} = \frac{V_c}{V} \cdot \gamma_c \cdot n_c = \frac{f_c}{\beta_c} \cdot \gamma_c \cdot \frac{n_c}{V}. \quad (22)$$

Установим физический смысл коэффициентов β_i ($i=c, i=cф$). По аналогии с формулой (4) уравнение (22) принимает вид,

$$K_p = \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_c} = \frac{f_c}{\beta_c} \cdot C_c. \quad (23)$$

Откуда следует, что коэффициент β_c (M^{-3})

$$\beta_c = \frac{f_c}{K_p} \cdot C_c \quad (24)$$

численно равен вероятности f_c наличия дефектов структуры при $\frac{K_p}{C_c} \rightarrow 1$.

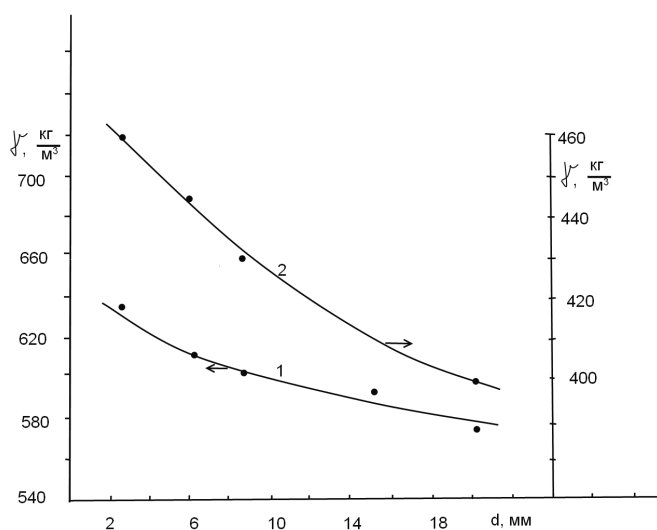


Рис. 4. Изменения насыпной плотности от диаметра сферических частиц (см. подпись к рис. 3) при $W = 3$ (график 1) и $1.5 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (2)

То же самое можно получить и для сферических частиц.

Анализ теоретических исследований показывает, что насыпная плотность торфяной продукции зависит от соотношения $\frac{\ell_i}{d_i}$, причем неодинаково от длины ℓ_i

наково от длины ℓ_i (при $d_i = \text{const}$) и диаметра d_i (при $\ell_i = \text{const}$) (см. формулу (3), рис. 3, 4). Это обстоятельство позволяет оптимизировать перевозки продукции для различных геометрических характеристик (ℓ_i, d_i) с использованием формул (13), (14), (15) с учетом прогнозирования физико-механических и технологических факторов (см. формулы: (18), (19), (21), (22)) в сравнении с модельными $(\ell_i = d_i)$ сферическими частицами различных размеров (диаметров). Предварительные экспериментальные исследования подтверждают зависимость $\gamma_{\text{нас}} = f(d_{\text{сф}})$ (см. рис. 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А.Е. физико-технологическое обоснование тепловых свойств торфа: монография /А.Е. Афанасьев, Ю.Л. Ковальчук. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2009. 172 с.
2. Антонов В.Я. Технология полевой сушки торфа: учебное пособие /В.Я. Антонов, Л.М. Малков, Н.И. Гамаюнов : 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. 239 с.
3. Афанасьев А.Е. Оптимизация процессов сушки и структурнообразования в технологии торфяного производства/ А.Е. Афанасьев, Н.В. Чураев – М.: Недра, 1992. 288 с.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Афанасьев А.Е. — доктор технических наук, профессор, lexich121@gmail.com,
Ефремов А.С. — бакалавр,
Тверской государственный технический университет.

