

УДК 621.867.8

Математическая модель процесса эрозионного износа элементов трубопровода систем пневматической транспортировки сыпучих материалов

К.Е. Демихов, А.А. Очков, В.М. Скорняков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Mathematical model of erosion wear of pipeline elements in pneumatic conveying systems for bulk materials

K.E. Demikhov, A.A. Ochkov, V.M. Skornyakov

Bauman Moscow State Technical University

Эксплуатация систем пневматической транспортировки сыпучих материалов сопровождается интенсивным эрозионным изнашиванием стенок трубопровода, наиболее выраженным на поворотных участках, что во многом определяет ресурс оборудования. Распространенные методы расчета на основе совместного моделирования вычислительной гидродинамики и метода дискретных элементов (CFD-DEM) требуют значительных вычислительных затрат и не позволяют проводить параметрические исследования для протяженных трубопроводов с многочисленными поворотами. Предложена одномерная математическая модель процесса эрозионного износа поворотных, прямых горизонтальных и вертикальных элементов трубопровода. Удельный износ представлен как сумма составляющих, обусловленных ударным и фрикционным механизмами. Ударная составляющая описана обобщенным эмпирическим соотношением Ока, а фрикционная — на основе закона износа при скольжении слоя дисперсной фазы по стенке трубопровода. Модель проверена сопоставлением с экспериментальными данными при калибровке по одной опорной точке для каждого набора. Медианное относительное расхождение расчетных и экспериментальных данных составило 4,6...9,9 % по скорости течения газа в разреженном режиме, 5...21 % по массовой концентрации и 19 % в переходном режиме. Отмечено, что прямые участки и режим плотной фазы в чистом виде требуют дополнительной проверки.

EDN: XZPSRK, <https://elibrary/xzpsrk>**Ключевые слова:** пневматическая транспортировка, сыпучий материал, эрозионный износ, математическая модель

The operation of pneumatic conveying systems for bulk materials is accompanied by intensive erosion wear of the pipe walls, which is most pronounced at bends and largely governs the service life of the equipment. Common computational approaches based on coupled computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) simulations require considerable computational cost and are impractical for parametric studies of long pipelines with numerous bends. This paper proposes a one-dimensional mathematical model of the erosion wear of straight horizontal, straight vertical, and bend pipe elements. The specific wear is represented as the sum of contributions from the impact and frictional mechanisms. The impact component is described by Oka's generalized empirical correlation, while the frictional component is based on a sliding-wear law for the dispersed-phase layer moving along the pipe wall. The model was validated against experimental data, with calibration to a single reference point for each data set. The median relative deviation between the computed and experi-

mental values was 4.6–9.9 % for the gas-velocity dependence in the dilute regime, 5–21 % for the mass-loading dependence, and 19% in the transitional regime. Straight pipe sections and the dense-phase regime in its pure form require further verification.

EDN: XZPSRK, <https://elibrary/xzpsrk>

Keywords: pneumatic conveying, bulk materials, erosion wear, mathematical model

Пневматическая транспортировка сыпучих материалов относится к основным технологическим операциям по переработке цемента, угольной пыли, гранул полимеров, катализаторов, минеральных удобрений и др. Однако эксплуатация систем пневматической транспортировки сыпучих материалов сопровождается интенсивным эрозионным изнашиванием стенок трубопровода, который наиболее выражен на его поворотных участках [1, 2].

В зависимости от массовой концентрации транспортируемого материала и скорости течения транспортирующего газа при пневматической транспортировке сыпучих материалов в системе могут наблюдаться два режима. В разреженном режиме транспортировки частицы перемещаются во взвешенном состоянии, а износ стенки определяется единичными соударениями частиц со стенкой трубопровода. В режиме плотной фазы частицы формируют движущийся слой или пробку, а износ вызван трением транспортируемого материала о стенку.

Современные подходы к расчету эрозии стенок трубопровода систем пневматической транспортировки в основном базируются на совместном расчете методами вычислительной гидродинамики и дискретных элементов (CFD–DEM). Это позволяет определить поле скоростей, концентрацию транспортируемого материала и углы соударения частиц, но сопряжено со значительными вычислительными и временными затратами [3, 4]. При характерной длине трубопроводов в десятки и сотни метров и количестве поворотных участков трехмерный расчет не допускает проведения параметрических исследований, при которых в широком диапазоне варьируются геометрические параметры трубопровода, расход газа и массовая концентрация транспортируемого материала.

Цель исследования — разработка одномерной математической модели процесса эрозионного износа стенок трубопровода при транспортировке сыпучего материала в режимах разреженной и плотной фаз.

Постановка задачи. В качестве искомой величины принят удельный эрозионный износ j -го элемента трубопровода

$$E_j = 10^6 \frac{m_{wlosj}}{m_{spas}}, \quad (1)$$

где m_{wlosj} — масса материала стенки, унесенная в j -м элементе за расчетный интервал, кг, m_{spas} — масса дисперсной фазы прошедшей j -й элемент за тот же интервал, кг.

Схема расчетной области (рис. 1) представляет собой трубопровод диаметром D , разбитый на элементы трех типов: прямые горизонтальные участки длиной L_h , прямые вертикальные участки длиной L_v и поворотные участки, характеризующиеся радиусом средней линии R_b и углом поворота θ_b . В рамках одномерного подхода удельный износ E_j принят осредненным по элементу, а локальное распределение износа по периметру и длине элементов не рассматривалось.

Удельный износ представляем в виде линейной интерполяции между двумя различными типами эрозии

$$E_j = [1 - S_j(v_g)] E_{dilj} + S_j(v_g) E_{densj},$$

где $S_j(v_g)$ — безразмерная весовая функция перехода между режимами транспортировки в функции скорости течения газа v_g ; E_{dilj} — удельный износ, обусловленный ударным взаимодействием частиц со стенкой, мг/кг, E_{densj} — удельный износ, обусловленный трением слоя дисперсной фазы со стенкой, мг/кг.

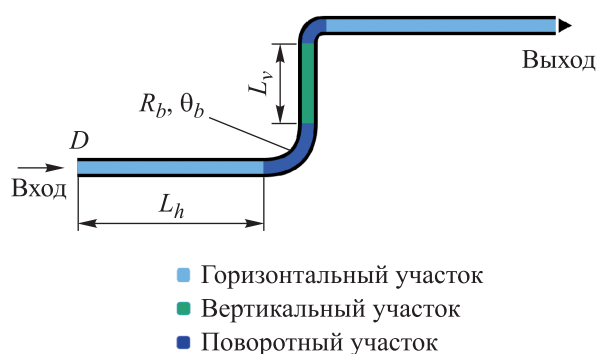


Рис. 1. Схема расчетной области трубопровода

Безразмерная весовая функция, характеризующая режим транспортировки сыпучих материалов, имеет вид

$$S_j = \left[1 + \left(\frac{v_g}{v_{crit}} \right)^2 \right]^{-1},$$

где v_{crit} — скорость течения газа, при которой осуществляется смена режима транспортировки, м/с [5].

Зависимость весовой функции S_j от отношения скоростей v_g/v_{salt} в трех режимах транспортировки показана на рис. 2, где v_{salt} — скорость осаждения на горизонтальном участке, м/с [5, 6].

При разработке математической модели процесса эрозии приняты следующие допущения:

- режим транспортировки — установившийся, при котором осредненные по времени параметры потока в пределах элемента трубопровода постоянны;
- в разреженном режиме транспортировки отсутствуют столкновения между частицами, влияющие на распределение скоростей дисперсной фазы;
- свойства материала стенки (твердость H_w и плотность ρ_w) — однородные в пределах элементов и не зависящие от температуры;
- электростатические эффекты, способные влиять на распределение частиц по сечению, отсутствуют;
- частицы транспортируемого сыпучего материала имеют единые параметры — диаметр d_p и плотность ρ_p .

Эрозия в разреженном режиме. Описание эрозионного износа в разреженном режиме

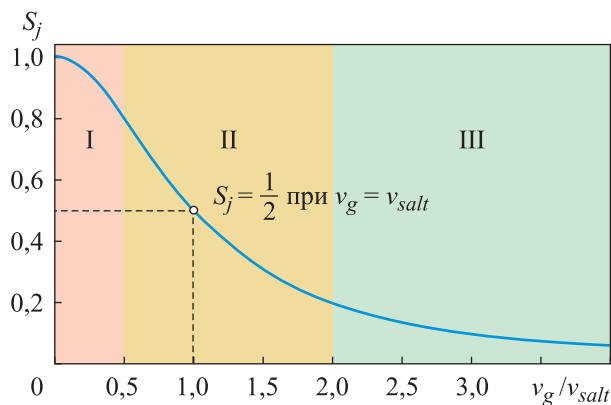


Рис. 2. Зависимость весовой функции S_j от отношения скоростей v_g/v_{salt} в режиме плотной фазы (I), переходном (II) и разреженном (III) режимах транспортировки

транспортировки основано на представлении о том, что суммарный унос материала стенки складывается из единичных соударений частиц дисперсной фазы с поверхностью. В качестве соотношения для объемного уноса материала за один акт соударения принята обобщенная корреляция [7, 8]:

$$V_{Oka} = K \left(\frac{H_w}{H_{wref}} \right)^{k_1} \left(\frac{v_{imp}}{v_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{k_3} g(\alpha).$$

Здесь V_{Oka} — удельный объемный унос материала стенки за один удар частицы со стенкой, м³/кг; K — калибровочная постоянная, м³/кг; H_{wref} — эталонная твердость материала стенки, ГПа; k_1 — степенной показатель, отражающий зависимость унесенного материала от твердости стенки; v_{imp} и v_{ref} — скорость соударения частицы со стенкой и ее эталонное значение, м/с; d_{ref} — эталонный диаметр частицы, м; k_2 и k_3 — степенные показатели скорости соударения и размера частицы; $g(\alpha)$ — угловая функция Ока, описывающая зависимость уноса материала от угла между вектором скорости частицы и плоскостью стенки в точке соударения (угла атаки частицы) α , рад [9]:

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} [1 + H_w (1 - \sin \alpha)]^{n_2},$$

где n_1 и n_2 — степенные показатели, определяющие режущую и деформационную составляющие механизма изнашивания.

Для определения удельного износа элемента трубопровода выполняют три последовательных перехода: переход к массовому уносу за один акт соударения, учет многократности соударений в пределах элемента и осреднение результата по всем частицам, прошедшим через элемент.

При прохождении одной частицы через j -й элемент совершается N_{eff} эффективных соударений со стенкой [6, 8], где эффективными считаются соударения, для которых угловая функция $g(\alpha) > 0$. С учетом эффекта экранирования частиц уже отскочивших, который описывает функция $C_{shj}(\mu)$ [10, 11], массу материала стенки, унесенную в результате прохождения элемента одной частицей определяем как

$$\Delta m_w = C_{shj}(\mu) N_{eff} \rho_w m_p K \times \left(\frac{H_w}{H_{wref}} \right)^{k_1} \left(\frac{v_{imp}}{v_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{k_3} g(\alpha), \quad (2)$$

где μ — массовая концентрация транспортируемого материала, кг/кг; m_p — масса частицы, кг.

Подставляя выражение (2) в соотношение (1) с учетом общего числа частиц, прошедших j -й элемент трубопровода, приходим к исходной форме удельного износа для разреженного режима транспортировки. После выделения калибровочных констант и размерных множителей в единый коэффициент

$$K_{dil} = 10^6 \rho_{wref} K C_0$$

получаем окончательное выражение для удельного износа в разреженном режиме

$$E_j = K_{dil} \Lambda_j \left(\frac{H_w}{H_{wref}} \right)^{k_1} \frac{\rho_w}{\rho_{wref}} \left(\frac{v_{impj}}{v_{ref}} \right)^{k_2} \times \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{k_3} g(\alpha_j) C_{shj}(\mu), \quad (3)$$

где ρ_{wref} — эталонная плотность материала стенки, кг/м³; C_0 — безразмерная постоянная, определяющая число эффективных соударений в эталонном элементе трубопровода; Λ_j — безразмерный геометрический множитель, зависящий от типа j -го элемента трубопровода и учитывающий особенности взаимодействия частиц со стенкой.

Кинематика частицы в установившемся режиме. Скорость соударения частицы со стенкой v_{imp} и угол атаки α , входящие в состав выражения (3), определяются из уравнения движения частицы в стационарном поле скорости потока газа. В приближении сферической частицы, движущейся под действием аэродинамического сопротивления и силы тяжести, запишем

$$\frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = \frac{\mathbf{v}_g - \mathbf{U}_p}{\tau_p} + \mathbf{g}.$$

Здесь $\mathbf{U}_p$ — вектор скорости частицы; $\mathbf{v}_g$ — вектор скорости течения газа; $\mathbf{g}$ — вектор ускорения свободного падения; τ_p — время динамической релаксации частицы,

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\eta_g},$$

где η_g — динамическая вязкость несущего газа, Па·с.

Поперечные перемещения частицы в пристеночной области, обусловленные турбулентностью потока газа, характеризуются динамической скоростью в потоке

$$u_* = \sqrt{\frac{f_g}{8}} v_g,$$

где f_g — коэффициент гидравлического сопротивления [12].

Безразмерное время релаксации в пристеночной области

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p u_*^2}{v_g},$$

где v_g — кинематическая вязкость газа, м²/с.

Нормальная составляющая скорости частицы у стенки, обусловленная турбулентностью, определяется как

$$u_{\perp}^{turb} = f(\tau_p^*) u_*,$$

где $f(\tau_p^*)$ — эмпирическая функция, характеризующая осаждение частиц [13, 14].

Прямой горизонтальный участок. Для прямого горизонтального участка длиной L_h и диаметром D износ обусловлен силой тяжести, которая смещает дисперсную фазу к нижней стенке трубопровода.

Взаимодействие частицы со стенкой характеризуется безразмерным отношением

$$X_h = \frac{v_g}{v_{salt}}.$$

При $X_h > 1$ осаждение на нижнюю стенку отсутствует, а при $X_h \leq 1$ формируется движущийся слой. Доля частиц, достигающая нижней стенки, определяется из функции вероятности контакта

$$P_h(X_h) = \frac{1}{1 + X_h^2}.$$

Геометрический множитель для горизонтального участка

$$\Lambda_h = \lambda_h \frac{L_h}{D} P_h(X_h),$$

где λ_h — число эффективных соударений на единицу относительной длины,

$$\lambda_h = \frac{D}{\Delta L} = \frac{u_{\perp}}{U_p}.$$

В первом приближении при $X_h > 1$ осевая составляющая скорости частицы

$$U_{ph} = v_g,$$

а состоящая из гравитационной и турбулентной компонент поперечная составляющая

$$u_{\perp h} = v_t + u_{\perp}^{turb},$$

где v_t — скорость витания, м/с [15].

Эффективный угол атаки α_h и модуль скорости соударения v_{imph} определяются как

$$\alpha_h = \arctg \frac{u_{\perp h}}{U_{ph}}; \quad v_{imph} = \sqrt{v_g^2 + u_{\perp h}^2}.$$

Прямой вертикальный участок. В вертикальном участке сила тяжести направлена вдоль оси трубопровода и не вызывает поперечного смещения частиц, поэтому здесь, в отличие от горизонтального участка, гравитационное осаждение отсутствует. Поперечный контакт частиц со стенкой обусловлен двумя факторами: пристеночной турбулентностью несущего газа и скоплением транспортируемых частиц у стенки жгутом. Это скопление формируется на предшествующем поворотном участке вследствие отклонения частиц от линии тока несущего газа. После выхода из поворота жгут постепенно рассеивается по сечению, и его вклад в износ убывает с осевой координатой.

С учетом влияния этих двух механизмов число эффективных соударений частицы со стенкой на участке длиной L_v имеет вид

$$\Lambda_v = \lambda_v \frac{L_v}{D} + \frac{P_{rop} U_{rop}}{|U_{pv}|} \frac{L_{mix}}{2D} \left(1 - e^{-\frac{2L_v}{L_{mix}}} \right).$$

Здесь $\lambda_v = u_{\perp}/|U_{pv}|$; P_{rop} — начальная доля частиц в жгуте, принятая равной доле частиц, осевших на стенку в предшествующем повороте I_b , $P_{rop} = I_b$; U_{rop} — начальная скорость жгута; $U_{pv} = v_g \mp V_t$ (знак минус соответствует восходящему потоку); L_{mix} — длина рассеяния жгута, определяемая турбулентной диффузией,

$$L_{mix} = \frac{D}{\kappa \sqrt{\frac{f_g}{8}}},$$

где κ — постоянная Кармана.

Начальная скорость жгута

$$U_{rop} = \frac{U_p}{2R_b} \frac{St_b}{1 + St_b},$$

где St_b — число Стокса.

Поперечная составляющая скорости жгута определяется выражением

$$u_{rv} = f(\tau_p^*) u^* + \frac{P_{rop} U_{rop}}{|U_{pv}|} \frac{L_{mix}}{2L_v} \left(1 - e^{-\frac{2L_v}{L_{mix}}} \right).$$

Эффективный угол атаки α_v и модуль скорости соударения v_{impv} вычисляем по выражениям

$$\alpha_v = \arctg \frac{u_{rv}}{|U_{pv}|}; \quad v_{impv} = \sqrt{U_{pv}^2 + u_{rv}^2}.$$

При отсутствии предшествующего поворота жгутовая добавка обращается в ноль, и контакт со стенкой определяется только турбулентной составляющей.

Поворотный участок. При прохождении поворотного участка частицы вследствие инерции отклоняются от линии тока несущего газа и накапливаются у стенки. Количественной мерой отклонения является число Стокса

$$St_b = \frac{\tau_p}{\tau_{turn}} = \frac{\rho_p d_p^2 U_{pb}}{18 \eta_g R_b},$$

τ_p — время релаксации частицы, с; τ_{turn} — характерное время поворота потока, с; U_{pb} — осевая скорость частицы на входе в поворот, м/с.

Инерционный фактор, описывающий долю частиц, достигающих стенки, определяется как

$$I_b = \frac{St_b}{St_b + St_0}.$$

где St_0 — число Стокса, характеризующее способность частицы достигать стенки поворотного участка.

Геометрические факторы в зависимости от относительного радиуса $\gamma_R(r_b)$ и углового фактора $\gamma_\theta(\theta_b)$ имеют следующий вид:

$$\gamma_R(r_b) = r_b^{1 - \frac{k_2}{2}}; \quad \gamma_\theta(\theta_b) = \frac{\theta_b}{\pi/2}.$$

Объединение трех факторов позволяет получить безразмерный множитель для поворотного участка

$$\Lambda_b = I_b \gamma_R(r_b) \gamma_\theta(\theta_b).$$

Эффективный угол атаки α_b и модуль скорости соударения v_{impb} определяются выражениями

$$\alpha_b = \arctg \left(\frac{1}{2r_b} \frac{St_b}{1 + St_b} \right); \quad v_{impb} = U_{pb}.$$

Эрозия в плотной фазе. При транспортировке материала в режиме плотной фазы, который реализуется при сравнительно низкой скорости (менее 7...10 м/с) и высокой массовой концен-

трации ($\mu > 15$), преобладающим механизмом изнашивания становится трение слоя материала, движущегося по поверхности стенки. Соотношением для описания такого режима износа служит закон [16]

$$V_w = K_A \frac{F_N L_s}{H_w}, \quad (4)$$

где V_w — объем материала стенки, унесенный при трении слоя о стенку, м^3 ; K_A — безразмерный коэффициент износа Арчарда; F_N — нормальная нагрузка на поверхность, Н; L_s — путь скольжения, м.

При дифференцировании соотношения (4) по времени и переходе к массовой скорости уноса материала получаем

$$E_{dens} = 10^6 \frac{\rho_w K_A F_N u_s}{Q_m H_w}, \quad (5)$$

где Q_m — массовый расход транспортируемого материала, кг/с .

Нормальную нагрузку и скорость скольжения слоя необходимо выразить через параметры системы пневматической транспортировки. Выражение существенно зависит от того, какую долю поперечного сечения занимает движущийся слой. Для разграничения режимов воспользуемся безразмерным параметром [5, 6]

$$\lambda = \frac{\Pi_{sj}}{\rho_b g (\sin \varphi + \mu_{pw} \cos \varphi)},$$

где Π_{sj} — составляющая градиента давления, обусловленная присутствием частиц в j -м элементе, Па/м ; ρ_b — насыпная плотность транспортируемого материала, кг/м^3 ; φ — угол наклона оси трубопровода к горизонту, рад ; μ_{pw} — коэффициент трения частиц о стенку.

Для движущегося слоя при $0 < \lambda < 1$ нормальная нагрузка определяется весом слоя, занимающего часть площади поперечного сечения $A_s = \lambda A$:

$$F_N = \rho_b \lambda A L_j g \cos \varphi, \quad (6)$$

где A — площадь поперечного сечения элемента, м^2 ; L_j — длина j -го элемента, м.

Скорость скольжения слоя

$$u_s = \frac{Q_m}{\rho_b \lambda A}. \quad (7)$$

Подставляя выражения (6) и (7) в формулу (5), получаем

$$E_{dens} = 10^6 \frac{\rho_w K_A}{H_w} g L \cos \varphi.$$

При $\lambda = 1$ нормальная нагрузка определяется через баланс сил, действующих в режиме пробки:

$$F_N = \frac{\Pi_s A L - \rho_b A L g \sin \varphi}{\mu_{pw}}.$$

Тогда удельный износ при транспортировке в режиме пробки

$$E_{dens} = 10^6 \frac{\rho_w K_A}{H_w} \frac{L}{\mu_{pw} \rho_b} (\Pi_s - \rho_b g \sin \varphi).$$

Поворотный участок. Применение закона (4) к поворотному участку требует учета центробежной силы. В этом случае нормальная нагрузка имеет вид

$$F_N = F_{N1} + F_c = \rho_b \lambda_b A L_b g \cos \theta_b + Q_m U_{sb} \theta_b,$$

где F_{N1} — нормальная составляющая силы тяжести слоя; F_c — центробежная сила,

$$F_c = \frac{Q_m^2 \theta_b}{\rho_b \lambda_b A}.$$

Тогда окончательное соотношение для удельного износа принимает вид

$$E_{densb} = 10^6 \frac{\rho_w K_A}{H_w} \left[g R_b \theta_b \cos \theta_b + \theta_b \left(\frac{Q_m}{\rho_b \lambda_b A} \right)^2 \right].$$

Результаты. Для проверки разработанной математической модели процесса расчетные значения удельного эрозионного износа сопоставлены с экспериментальными данными [6, 17–20]. Так как абсолютный уровень износа определяется парой материал стенки — материал частицы и особенностями экспериментального стенда, для каждого набора данных проведена калибровка по одной опорной точке.

Расчетная зависимость удельного эрозионного износа E от скорости течения газа v_g в разреженном режиме транспортировки материала с различными значениями диаметра и массовой концентрации приведена на рис. 3. Там же показаны аналогичные экспериментальные зависимости, полученные при исследовании поворотных участков с двумя наборами данных. Первый [17] получен для поворотного участка из нержавеющей стали с относительным радиусом $R/D = 1,5$, где транспортируемым материалом являлся кварцевый песок диаметром $d = 300$ мкм с массовой концентрацией $\mu = 0,03$, второй [6, 18] — для поворотного участка из малоуглеродистой стали с $R/D = 5$ для песка

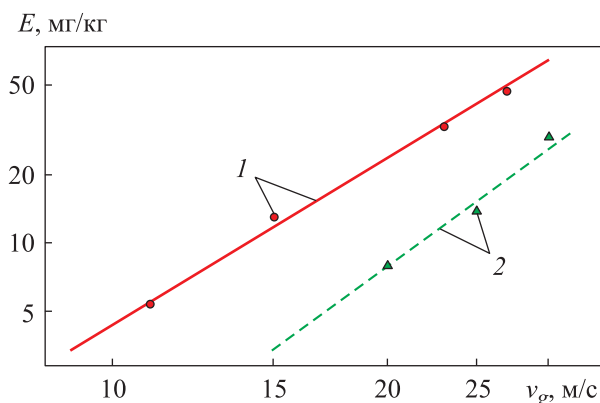


Рис. 3. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости удельного эрозионного износа E от скорости течения газа v_g в разреженном режиме транспортировки материала с различными значениями диаметра и массовой концентрации: 1 — $d = 300$ мкм; $\mu = 0,03$; 2 — $d = 70$ мкм, $\mu = 2,00$

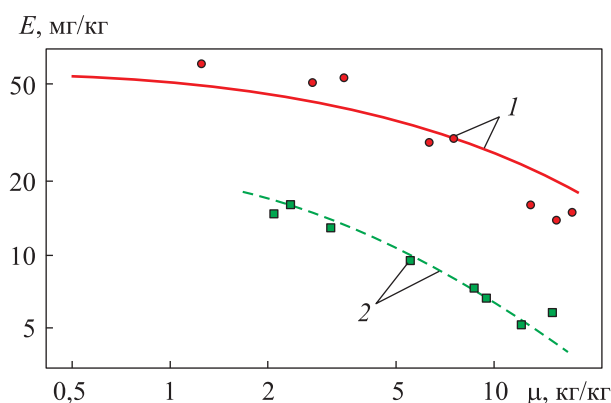


Рис. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости удельного эрозионного износа E от массовой концентрации μ в разреженном режиме транспортировки материала диаметром $d = 280$ (1) и 190 (2) мкм

с параметрами $d = 70$ мкм и $\mu = 2,00$. Медианное относительное расхождение составило 4,6 и 9,9 % соответственно.

Расчетная зависимость удельного эрозионного износа E от массовой концентрации μ в разреженном режиме транспортировки материала диаметром $d = 280$ и 190 мкм приведена на рис. 4. Она сопоставлена с двумя наборами экспериментальных данных. Первый [19] получен при $R/D = 6, 10$ и 14 , $d = 280$ мкм, $v_g = 30$ м/с и $\mu = 1...17$, второй [11] — при $R/D = 3$, $d = 190$ мкм, $v_g = 34$ м/с, $\mu = 2...15$. Медианное относительное расхождение составило 21 и 5 % соответственно.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений удельного эрозион-

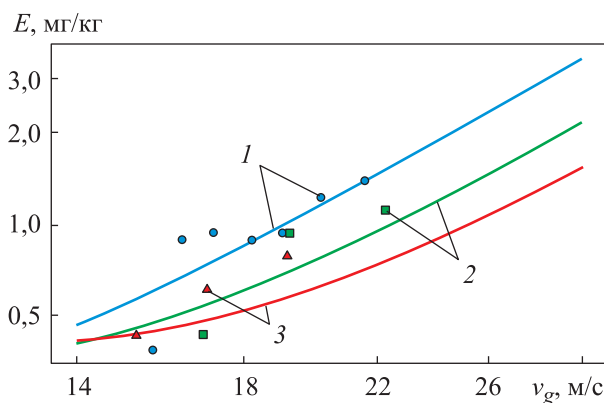


Рис. 5. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости удельного эрозионного износа E от скорости течения газа v_g в переходном режиме транспортировки при массовой концентрации песка $\mu = 10$ (1), 17 (2) и 22 (3)

ного износа в переходном режиме транспортировки [20], где одновременно действовали оба механизма износа, приведены на рис. 5. Экспериментальные данные получены для поворотных участков с $D = 50$ мм и $R/D = 2,8$ при транспортировке кварцевого песка с параметрами $d = 60...65$ мкм, $v_g = 15...22$ м/с и $\mu = 10, 17$ и 22 . Удельный износ рассчитан как сумма ударной и фрикционной составляющих. Медианное относительное расхождение составило 19 %.

Выводы

1. Разработана одномерная математическая модель процесса эрозионного износа элементов трубопроводов системы пневматической транспортировки сыпучих материалов в режимах разреженной и плотной фаз.

2. Модель проверена сопоставлением с экспериментальными данными при калибровке по одной опорной точке для каждого набора данных. В разреженном режиме медианное относительное расхождение расчетных и экспериментальных данных составило 4,6 [17], 9,9 [6, 18], 5 [11] и 21 % [19], а в переходном режиме — 19 %.

3. Сопоставление проведено для поворотных участков трубопровода в разреженном и переходном режимах транспортировки. Прямые участки трубопровода и режим транспортировки в плотной фазе в чистом виде требуют отдельной проверки и определяют направление дальнейшей работы.

Литература

- [1] Демихов К.Е., Очков А.А., Скорняков В.М. Перспективы развития систем пневматической транспортировки сыпучих материалов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 85–101. EDN: MZKPOK
- [2] Verma R., Agarwal V.K., Pandey R.K. et al. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2018, vol. 7, no. 3 pp. 193–214, doi: <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0055-7>
- [3] Kuang S., Zhou M., Yu A. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: a review. *Powder Technol.*, 2020, vol. 365, pp. 186–207, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.011>
- [4] Parsi M., Najmi K., Najafifard F. et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2014, vol. 21, pp. 850–873, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.10.001>
- [5] Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F. et al. Pneumatic conveying of solids. *Springer*, 1997. 599 p.
- [6] Mills D. *Pneumatic conveying design guide*. Butterworth-Heinemann, 2016. 806 p.
- [7] Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
- [8] Hutchings I.M. *Tribology. Friction and wear of engineering materials*. Edward Arnold, 1992. 273 p.
- [9] Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- [10] Mason J.S., Smith B.V. The erosion of bends by pneumatically conveyed suspensions of abrasive particles. *Powder Technol.*, 1972, vol. 6, no. 6, pp. 323–335, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)83030-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)83030-4)
- [11] Macchini R., Bradley M.S.A., Deng T. Influence of particle size, density, particle concentration on bend erosive wear in pneumatic conveyors. *Wear*, 2013, vol. 303, no. 1–2, pp. 21–29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.014>
- [12] Haaland S.E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *J. Fluids Eng.*, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3240948>
- [13] Friedlander S.K., Johnstone H.F. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams. *Ind. Eng. Chem.*, 1957, vol. 49, no. 7, pp. 1151–1156, doi: <https://doi.org/10.1021/ie50571a039>
- [14] Liu B.Y.H., Agarwal J.K. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. *J. Aerosol Sci.*, 1974, vol. 5, no. 2, pp. 145–155, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(74\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(74)90046-9)
- [15] Cheng N.S. Simplified settling velocity formula for sediment particle. *J. Hydraul. Eng.*, 1997, vol. 123, no. 2, pp. 149–152.
- [16] Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.*, 1953, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- [17] Vieira R.E., Mansouri A., McLaury B.S. et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow. *Powder Technol.*, 2016, vol. 288, pp. 339–353, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.028>
- [18] Mills D., Mason J.S. Particle size effects in bend erosion. *Wear*, 1977, vol. 44, no. 2, pp. 311–328, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8)
- [19] Deng T., Chaudhry A.R., Patel M. et al. Effect of particle concentration on erosion rate of mild steel bends in a pneumatic conveyor. *Wear*, 2005, vol. 258, no. 1–4, pp. 480–487, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.001>
- [20] Tong K.N. *The erosion of pipe bends in pneumatic conveying systems*. PhD thesis. London, Thames Polytechnic, School of Mechanical Engineering, 1981. 415 p.

References

- [1] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Skornyakov V.M. Perspektivy razvitiya sistem pnevmaticheskoy transportirovki sypuchikh materialov. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2026, no. 2, pp. 85–101. EDN: MZKPOK (In Russ.).
- [2] Verma R., Agarwal V.K., Pandey R.K. et al. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2018, vol. 7, no. 3 pp. 193–214, doi: <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0055-7>
- [3] Kuang S., Zhou M., Yu A. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: a review. *Powder Technol.*, 2020, vol. 365, pp. 186–207, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.011>
- [4] Parsi M., Najmi K., Najafifard F. et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2014, vol. 21, pp. 850–873, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.10.001>
- [5] Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F. et al. Pneumatic conveying of solids. *Springer*, 1997. 599 p.
- [6] Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
- [7] Hutchings I.M. *Tribology. Friction and wear of engineering materials*. Edward Arnold, 1992. 273 p.
- [8] Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- [9] Mills D. *Pneumatic conveying design guide*. Butterworth-Heinemann, 2016. 806 p.
- [10] Mason J.S., Smith B.V. The erosion of bends by pneumatically conveyed suspensions of abrasive particles. *Powder Technol.*, 1972, vol. 6, no. 6, pp. 323–335, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)83030-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)83030-4)
- [11] Macchini R., Bradley M.S.A., Deng T. Influence of particle size, density, particle concentration on bend erosive wear in pneumatic conveyors. *Wear*, 2013, vol. 303, no. 1–2, pp. 21–29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.014>
- [12] Haaland S.E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *J. Fluids Eng.*, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3240948>
- [13] Friedlander S.K., Johnstone H.F. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams. *Ind. Eng. Chem.*, 1957, vol. 49, no. 7, pp. 1151–1156, doi: <https://doi.org/10.1021/ie50571a039>
- [14] Liu B.Y.H., Agarwal J.K. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. *J. Aerosol Sci.*, 1974, vol. 5, no. 2, pp. 145–155, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(74\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(74)90046-9)
- [15] Cheng N.S. Simplified settling velocity formula for sediment particle. *J. Hydraul. Eng.*, 1997, vol. 123, no. 2, pp. 149–152.
- [16] Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.*, 1953, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- [17] Vieira R.E., Mansouri A., McLaury B.S. et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow. *Powder Technol.*, 2016, vol. 288, pp. 339–353, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.028>
- [18] Mills D., Mason J.S. Particle size effects in bend erosion. *Wear*, 1977, vol. 44, no. 2, pp. 311–328, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8)
- [19] Deng T., Chaudhry A.R., Patel M. et al. Effect of particle concentration on erosion rate of mild steel bends in a pneumatic conveyor. *Wear*, 2005, vol. 258, no. 1–4, pp. 480–487, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.001>
- [20] Tong K.N. *The erosion of pipe bends in pneumatic conveying systems*. PhD thesis. London, Thames Polytechnic, School of Mechanical Engineering, 1981. 415 p.

Информация об авторах

ДЕМИХОВ Константин Евгеньевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ked@bmstu.ru).

ОЧКОВ Андрей Андреевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aochkov@bmstu.ru).

СКОРНЯКОВ Владимир Михайлович — ассистент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: skorniyakov@bmstu.ru).

Information about the authors

DEMIKHOV Konstantin Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Vacuum and Compressor Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ked@bmstu.ru).

OCHKOV Andrey Andreevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Vacuum and Compressor Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aochkov@bmstu.ru).

SKORNYAKOV Vladimir Mikhailovich — Assistant, Department of Vacuum and Compressor Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: skorniyakov@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Демихов К.Е., Очков А.А., Скорняков В.М. Математическая модель процесса эрозионного износа элементов трубопровода систем пневматической транспортировки сыпучих материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 8, с. 63–72.

Please cite this article in English as:

Demikhov K.E., Ochkov A.A., Skorniyakov V.M. Mathematical model of erosion wear of pipeline elements in pneumatic conveying systems for bulk materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 8, pp. 63–72.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию «Применение цифровых технологий промышленной логистики на примере нефтеперерабатывающих заводов»

Авторы: М.Н. Захаров, А.С. Саркисов

Рассмотрены основные вопросы использования цифровых технологий в задачах планирования нефтепереработки. Теоретический материал иллюстрируется примерами, связанными с работой нефтеперерабатывающих заводов.

Для студентов, обучающихся по инженерно-экономическим специальностям, и специалистов, участвующих в планировании капитальных вложений, подготовке финансовых и инвестиционных решений в области топливно-энергетического комплекса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>