

DOI: 10.12737/22091

Логачев И.Н., д-р техн. наук., проф.,
 Попов Е.Н., ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЛЕКТИВА ПАДАЮЩИХ ЧАСТИЦ С ВОЗДУХОМ*

Evg-popov@yandex.ru

В горноперерабатывающей промышленности значительная часть технологических процессов сопровождаются загрузками сыпучего материала в различные емкости и бункера. При загрузке бункеров силосного типа саморазгружающимися тележками проблема выбивания пыли из загрузочных проемов стоит особенно остро. Работа посвящена совершенствованию методов расчета аспирации при загрузках бункеров силосного типа полидисперсным материалом. Предложен новый статистический подход к учету условий стесненности на коэффициент лобового сопротивления частиц в условиях свободной струи падающего материала. При падении свободной струи материала частицы более крупных фракций затевают мелкие и пылевые частицы, аэродинамическое сопротивление которых в таких условиях не значительно. Был предложен аналитический вывод вероятности активного воздействия на воздух частиц, находящихся вне аэродинамической тени, что позволяет получить методику оценки эжектирующей способности потока частиц при обеспыливании бункеров силосного типа. При дальнейшем развитии данного подхода возможен вывод вероятности аэродинамического взаимодействия частиц полидисперсного материала. Учет дисперсности перегружаемого материала позволит рассчитать оптимальное количество аспирационного воздуха и снизить энергопотребление систем аспирации.

Ключевые слова: аспирация бункеров, загрузка бункеров, полидисперсный материал, эжектирование воздуха, динамика частиц, аэродинамика, обеспыливающая вентиляция.

Введение. Значительная часть технологических процессов переработки горных пород сопровождаются загрузками сыпучего материала в различные емкости и бункера.

Расход аспирационного воздуха, удаляемого от местных отсосов является основным параметром, определяющим энергоемкость и стоимость эксплуатации вытяжной вентиляции.

Существующие методики определения расхода эжектируемого воздуха, предполагают замену реального полидисперсного материала неким монофракционным материалом, имеющим частицы некоторого среднего диаметра. Большая часть обрабатываемых материалов являются полидисперсными, что приводит к необходимости введения опытных коэффициентов.

В случае значительной площади загрузочных проемов, что характерно для бункеров силосного типа как правило руководствуются защитной скоростью 0,5–1 м/с, обеспечивающей невыбивание запыленного воздуха из бункера. Такой подход приводит к значительным расходам аспирационного воздуха, не учитывающих как особенностей самого перегружаемого материала, так и аэродинамических процессов протекающих внутри бункера.

В связи с этим уточнение существующих методик расчета и проектирования систем аспирации на предприятиях горноперерабатываю-

щей отрасли является весьма актуальной задачей.

Фундаментальные основы теории эжекции воздуха равноускоренным потоком падающих частиц были заложены С.Е. Бутаковым [1] и развиты О.Д. Нейковым [2]. В последние годы проблемой снижения объемов аспирируемого воздуха в России занимались В.А. Минко, И.Н. Логачев [3], К.И. Логачев [4], изучившие закономерности движения сыпучих материалов по желобам. Так же проблемами аспирации бункеров занимались Семинко А.С., Гольцов А.Б. [5, 6]. За рубежом известны работы Олифера В.Д. [7], Ze Qin Liu [8]. Однако в трудах этих ученых рассматриваются главным образом монофракционные потоки в то время как большинство перерабатываемых материалов полифракционные.

Основная часть. Аэродинамическое взаимодействие коллектива частиц в струе материала и эжектируемого воздуха, как известно [4], определяется суммой аэродинамических сил всех частиц этого коллектива в единице объема $dV = S \cdot dx$:

$$dA = c \cdot R \cdot S \cdot dx, \quad (1)$$

где $R = \psi \cdot F_m \cdot \rho \frac{(v-u)^2}{2}$ – аэродинамическая сила одной частицы, Н; ρ – плотность воздуха,

кг/м³; c – счетная концентрация частиц, 1/м³; dV – элементарный объем двухкомпонентной среды «твердые частицы – воздух», м³; F_m – площадь миделевого сечения частицы, м²; u – скорость эжектируемого воздуха, м/с; ψ – коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий в общем случае, от геометрической формы, числа Рейнольдса относительного движения и объемной концентрации этих частиц.

В отличие от достаточно полно изученного механизма межкомпонентного взаимодействия в потоке усредненных по крупности частиц мы будем рассматривать аэродинамическое взаимодействие потока частиц с разными эквивалентными диаметрами $d_1 > d_2 > \dots > d_N$, т.е. поток полифракционного сыпучего материала, состоящего из N фракций.

Будем рассматривать ускоренный поток свободно падающих частиц, объемная концентрация которых уменьшается по мере перемещения материала от "насыпной" (во время транспортировки конвейером или в момент сбрасывания)

$$\beta_n = \frac{\rho_{nc}}{\rho_c}$$

до "разреженной" (при падении)

$$\beta = \frac{G}{S \cdot \rho_m \cdot v}, \quad (2)$$

где G – массовый расход падающих частиц, кг/с; S – площадь поперечного сечения струи частиц, м²; v – скорость падения частицы, м/с; ρ_m, ρ_{nc} – соответственно, плотности материала частиц и их насыпная плотность, кг/м³.

Чтобы не вводить эмпирические поправки на коэффициент ψ^* , связанные со стесненностью частиц в процессе их падения используем вероятностный подход. Так как обычно эти поправки связаны с объемной концентрацией потока частиц условной монофракции, а не реального потока частиц разной крупности. Предположим, что коэффициент лобового сопротивления частиц i -й фракции пропорционален вероятности активного аэродинамического взаимодействия этой частицы P_{ai} :

$$\psi_i = K_p \cdot \psi_{0i} \cdot P_{ai}; \quad (3)$$

$$P_{ai} = 1 - P_i(T_i),$$

где $K_p \leq 1$ – коэффициент пропорциональности (в дальнейшем коэффициент пропорциональности K_p принимаем равным единице); $P_i(T_i)$ –

вероятность нахождения частицы в аэродинамической тени; ψ_{0i} – коэффициент лобового сопротивления одиночной (свободной, не затененной) частицы i -й фракции.

Таким образом под вероятностью P_{ai} будем понимать отношение количества частиц, находящихся вне аэродинамической тени к общему количеству частиц в рассматриваемом объеме двухкомпонентной смеси. Ее величина в процессе падения частиц будет возрастать практически от нуля (в момент сбрасывания, когда все частицы находятся в аэродинамической тени соседних частиц) до величины, близкой к единице (при весьма разреженном коллективе частиц, падающих с большой скоростью).

Рассмотрим случай падения коллектива одинаковых по массе частиц.

Полагаем, что место положения частицы в элементарном объеме равновероятно и объемная концентрация этих частиц равна:

$$\beta = \frac{G}{S \cdot \rho_m \cdot v}, \quad (4)$$

где G – массовый расход частиц, кг/с; S – поперечное сечение струи, м²; ρ_m – плотность частиц, кг/м³; v – скорость частиц, м/с.

В силу этого вероятность нахождения частицы в аэродинамической тени $P(T)$ других частиц в этом элементарном объеме составляет:

$$P(T) = \frac{\Omega \cdot c \cdot dV}{dV - W \cdot c \cdot dV}, \quad (5)$$

где c – счетная концентрация частиц в элементарном объеме $dV = S \cdot dx$, шт/м³, очевидно равна

$$c = \frac{\beta}{W}, \quad (6)$$

W – объем одной частицы, м³, Ω – объем аэродинамической тени одной частицы, м³

Тогда с учетом (6) имеем:

$$P(T) = \frac{\Omega \cdot \beta}{1 - \beta}, \quad (7)$$

Вероятность активного воздействия частиц на воздух, которую можно рассматривать как противоположное событие нахождению частиц в аэродинамической тени, равна:

$$P(A) = 1 - P(T) = 1 - \frac{K \cdot \beta}{1 - \beta}, \quad (8)$$

где

$$K = \frac{\Omega}{W} \quad (9)$$

Объем аэродинамической тени зависит от формы частиц и числа Рейнольдса. При $Re > 10^5$ по данным академика Скочинского А.А., приведенных в справочнике И.Е. Идельчика [9]: а) для случая поперечного обтекания бруса сечением $a \cdot b$ (вектор скорости воздуха направлен вдоль длинной стороны a): $K = 30$ при $a/b = 2,2$ ([9], стр. 407); б) для случая поперечного обтекания цилиндра диаметром d : $K = 100$; в) для случая поперечного обтекания диска диаметром d и толщиной δ (вектор скорости воздуха направлен перпендикулярно плоскости диска): $K = 4,8 \frac{d}{\delta}$, ([9], стр. 4067) ($K = 48$ при $\delta = 0,1 d$), ([9], стр. 397).

В данном случае в качестве длины аэродинамической тени принималось наименьшее расстояние между двумя одинаковыми телами, когда суммарный коэффициент лобового сопротивления становится равным удвоенному коэффициенту лобового сопротивления одиночного тела. Если принять более жесткие условия для аэродинамической тени, например, если принять, что при нахождении частицы в "плотной" тени суммарный коэффициент равен коэффициенту сопротивления одиночной частицы, то отношение $\Omega/W = 10$ – для случая "а"; $\Omega/W = 3$ – для случая "б"; $\Omega/W = 2 \cdot d/\delta$ – для случая "в".

Примем средневзвешенное значение K для рассмотренных тел при двукратном значении суммы коэффициентов местного сопротивления в качестве реперного расчета $K = \frac{30 + 100 + 48}{3} = 63$.

Очевидно, вероятность нахождения в аэродинамической тени двух и более частиц ($n > 2$) будет равна произведению вероятности

$$P_n(A) = \left(\frac{K \cdot \beta}{1 - \beta} \right)^n, \quad (10)$$

или т.к. $\beta \ll 1$

$$P_n(A) \approx (K \cdot \beta)^n (1 + n \cdot \beta), \quad (11)$$

Для потока свободно падающих частиц с конвейера уже на высоте $H = 1$ м объемная концентрация чаще всего $\beta < 0,01$, и потому вероятность нахождения частицы в "плотной" тени второй частицы, скажем для случая "б" (при $K = 3$), составляет $P_2(T) \leq 0,001$. Можем этот случай считать маловероятным, поскольку веро-

ятность его по сравнению со случаем нахождения в тени первой частицы по крайней мере на порядок больше.

Однако в случае потока полифракционных частиц этой вероятностью пренебрегать нельзя. Дальнейшая работа должна быть направлена на определение вероятностей активного аэродинамического взаимодействия для полидисперсного материала.

Заключение. Поток падающего материала условно разделяется на аэродинамически активные частицы и частицы, находящиеся в аэродинамической тени и не участвующие в силах аэродинамического взаимодействия при эжектировании воздуха в свободных струях падающего материала.

Выводы. Произведен аналитический вывод вероятности активного воздействия частиц на воздух в свободной струе падающего материала, позволяющий не прибегая к эмпирическим соотношениям определить эжектирующую способность этой струи. Усовершенствованная методика расчета расхода аспирационного воздуха при загрузках бункеров силосного типа, позволит снизить энергоемкость систем аспирации.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект # 14-41-08005 р офи м), а так же в рамках НИР «Разработка методик расчета систем обеспыливания и исследование условий загрузки бункеров с учетом дисперсности материалов» НИР: Б8/13.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутаков С. Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1949. 268 с.
2. Нейков О. Д., Логачев И. Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. М.: Металлургия, 1981. 192 с.
3. Обеспыливающая вентиляция: монография / В.А. Минко, И.Н. Логачев, К.И. Логачев и др.; под общ. ред. В.А. Минко. Белгород: изд-во БГТУ, 2010. 565 с.
4. Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., and Dmitrienko V.G., Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Refractories and Industrial Ceramics. 2016. 57. P. 103–107.
5. Попов Е.Н., Семенов А.С. Определение объемов аспирационного воздуха при обеспыливании бункеров // Наука и молодежь в начале нового столетия: Материалы III Международной науч.-практ. конф. Губкин: ИП Уваров В.М. 2010. С. 71–75.

6. Гольцов А.Б., Киреев В.М., Попов Е.Н. Проблемы комплексного обеспыливания при переработке рудных материалов // Сборник трудов № 4. Воронеж: изд-во ВГАСУ, 2007. С. 123–129.

7. Гервасьев А. М., Олифер В. Д. Некоторые результаты исследования процессов, происходящих при перегрузке сыпучих материалов по вертикальным желобам. – В об. Обеспыливающая вентиляция / ВНИОТ г. Свердловск. 1973. 3–9 с.

8. Liu Ze Qin, 2003. Air entrainment in free falling bulk materials, Doctor of Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

9. Идельчик И. Е.. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Книга по Требованию, 2012. 466 с.

10. Пулачев В.С. Теория вероятности к математической статистике. Москва: Наука, 1979. С. 496.

Logachev I.N., Popov E.N.

PROBABILITY AND STATISTICAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF AERODYNAMIC INTERACTION OF COLLECTIVE OF INCIDENT PARTICLES WITH AIR

In the mountain industry a considerable part of technological processes are followed by loadings of bulk in various capacities and the bunker. When loading bunkers of silage type self-dumping carts the problem of knocking-out of dust from loading apertures is particularly acute especially. Work is devoted to improvement of methods of calculation of aspiration when loadings bunkers of silage type by polydisperse material. New statistical approach to the accounting of conditions of constraint on coefficient of front resistance of particles in the conditions of a free stream of the falling material is offered. When falling a free stream of material of a particle of larger fractions shade small and dust particles which aerodynamic resistance in such conditions isn't considerable. Analytical conclusion of probability of active impact on air of the particles which are out of an aerodynamic shadow that allows to receive a technique of assessment of ezhektiruyushchy ability of a stream of particles at dust removal of bunkers of silage type has been offered. At further development of this approach a conclusion of probability of aerodynamic interaction of particles of polydisperse material is possible. The accounting of dispersion of the overloaded material will allow to calculate optimum amount of aspiration air and to reduce energy consumption of systems of aspiration.

Key words: aspiration of bunkers, loading of bunkers, unequigranular material, ejection of air, loudspeaker of particles, aerodynamics, dedusting ventilation.

Логачев Иван Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: kilogachev@mail.ru

Попов Евгений Николаевич, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: evg-popov@yandex.ru