УДК 624.647.2

Р.В. Кирия

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО ГРУЗА В ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УЗЛАХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Одержано рівняння руху сипучого середовища у перевантажувальних вузлах стрічкового конвейєра. Розглянуто фізичну суть коефіцієнта внутрішнього опору (макров'язкості) при швидкому русі сипучого середовища. Бібліогр.: 9 найм.

Опыт эксплуатации конвейерных комплексов на горных предприятиях показал, что малая эффективность работы перегрузочных узлов связана с низким уровнем проектирования и необоснованным выбором их конструктивных параметров. Одним из методов повышения уровня проектирования перегрузочных узлов является изучение движения сыпучего груза с помощью математических моделей на ЭВМ. Однако из-за сложных реологических свойств сыпучего груза в настоящее время не существует достаточно общих математических моделей, описывающих в полной мере его движение в пунктах перегрузки.

Сыпучий груз в перегрузочных узлах может находиться в трех "агрегатных " состояниях: твердого тела; пластического течения и быстрого текучего движения [1,2].

Если сыпучий груз находится в состоянии твердого тела, то касательные напряжения в нем меньше предельного значения. В этом случае между частицами сыпучего груза перемещение отсутствует и для напряжений справедлив закон Гука. При пластическом движении сыпучего груза касательные напряжения достигают предельного значения. В этом случае частицы сыпучего груза проскальзывают относительно друг друга, а касательные и нормальные напряжения связаны законом Кулона [1]:

$$\tau=k\cdot\sigma \qquad (1)$$

где τ,σ - касательные и нормальные напряжения в некоторой точке сыпучего груза;

k - коэффициенты внутреннего трения сыпучего груза.

При быстром движении сыпучего груза между частицами появляется пустое пространство и они сталкиваются между собой, находясь в непрерывном хаотическом движении подобно молекулам плотных газов. В результате, при движении происходит увеличение объема сыпучей среды. Это явление называется дилатансией [2].

В этом случае сыпучий груз ведет себя подобно потоку жидкости или газа, а касательные напряжения зависят от градиента средней скорости потока [2]:

$$\tau = f\left(\frac{dv}{dy}\right), \qquad (2)$$

где v - средняя скорость потока сыпучего груза.

Чаще всего состояние твердого тела и пластического течения сыпучего груза наблюдается в бункерах при выпуске руды, когда движение сильно стеснено твердыми стенками.

В перегрузочных узлах быстрое движение сыпучего груза происходит в лотках, на полках, барабане и ленте конвейера. Пластическое течение сыпучего груза в перегрузочных узлах наблюдается в подпорном клине при взаимодействии с полкой и лентой, а также в состоянии, близком к завалу [3].

Если для твердого и пластического состояния сыпучей среды (груза) имеются хорошо разработанные математические модели [1.4], то для быстрого движения сыпучей среды таких простых, применяемых на практике, математических моделей нет. Многообразие сложных реологических моделей движения сыпучей среды связано с тем, что его среднее движение, как и в турбулентном потоке, в большей степени зависит от случайного характера движения частиц. Поэтому небольшие изменения внешних условий может существенно изменить структуру движения сыпучей среды, а в некоторых случаях сыпучая среда может перейти в твердое или пластическое состояние (явление завала, сводообразования).

Следовательно, для описания движения сыпучего груза более естественно применение статистического подхода, то есть кинетических методов [5].

Предположим, что размер частиц сыпучей среды намного меньше линейных размеров перегрузочного узла, тогда движение сыпучей среды можно представить в виде суммы осредненного и случайного составляющих движения:

$$v = v_c + v', \tag{3}$$

где v_c - средняя скорость движения частиц сыпучей среды;

v' - случайная или пульсационная составляющая скорости частиц сыпучей среды.

Рассмотрим движение сыпучей среды как систему случайно сталкивающихся между собой твердых частиц примерно одного и того же диаметра.

Тогда, согласно [5,6], на статистической (мезоскопической) стадии эволюции системы движения частиц можно описать уравнениями Л. Больцмана или уравнениями Д. Энского [7]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v}\,\mathrm{grad}_r f + \frac{1}{m}\vec{F}\,\mathrm{grad}_v f = J(f,f) \tag{4}$$

где $f(\vec{v},\vec{r},t)$ - функция распределения скоростей частиц сыпучей среды;

$\vec{v}$ - вектор скоростей частиц сыпучей среды;

$\vec{r}$ - радиус вектор некоторой точки потока;

m - масса частицы сыпучей среды;

$\vec{F}$ - сумма внешних сил, действующих на частицу сыпучей среды (в частности, сила веса);

$\mathrm{grad}_r f$, $\mathrm{grad}_v f$ - градиенты функции распределения скоростей частиц сыпучей среды по координатам и скоростям соответственно;

$J(f,f)$ - столкновительный член сыпучей среды.

Уравнение (4) справедливо, когда масштаб времени t гораздо больше времени взаимодействий частиц $\tau_в$ и соизмерим с временем релаксации системы τ_p ($\tau_в \ll t \sim \tau_p$). Время релаксации - это время, в течение которого система, выведенная из состояния статистического равновесия, переходит в прежнее состояние. Для сыпучей среды время релаксации обратно пропорционально частоте случайной (пульсационной) составляющей скорости частиц сыпучей среды и составляет $\tau_p \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$ с.

В реальных условиях время движения сыпучей среды в перегрузочных узлах значительно больше времени релаксации τ_p ($t \gg 10^{-3} \div 10^{-4}$ с). Следовательно, согласно [5,6] состояние сыпучей среды при движении в перегрузочных узлах близко к статистическому равновесному и представляет собой гидродинамическую (диффузионную) стадию эволюции системы. В этом случае система находится в локальном статистически равновесном состоянии и описывается законами линейной неравновесной термодинамики Л. Онзагера [1].

Поэтому процессы, происходящие при движении сыпучей среды на этой стадии, можно описать линейными Марковскими процессами и уравнение (4) можно представить в виде уравнения Л. Больцмана с релаксационным столкновительным членом в виде [5]:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{v}\,\mathrm{grad}_r f+\frac{1}{m}\vec{F}\,\mathrm{grad}_v f=\frac{f_0-f}{\tau_p}, \tag{5}$$

где f_0 - равновесная Максвеловская функция распределения скоростей частиц сыпучегй среды [2].

Предположим, что при взаимодействии твердых частиц сыпучей среды справедливы законы сохранения массы и количества движения.

Умножим последовательно левую и правую часть уравнения (5) на m и проекции $m\vec{v}$. Проинтегрируем полученные соотношения по скорости, а затем преобразуем согласно работе [5].

Тогда получим уравнение сохранения массы и изменение количества движения для осредненного потока сыпучей среды. Если при этом учесть, что сыпучая среда локально однородна и изотропна, то система уравнений осредненного движения сыпучей среды примет вид:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial \rho_c}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho_c\,\vec{v}_c)=0\\[2mm] \dfrac{\partial \vec{v}_c}{\partial t}+(\vec{v}_c\nabla)\,\vec{v}_c=\dfrac{1}{\rho_c}\vec{F}_c-\dfrac{1}{\rho_c}\,\mathrm{grad}P_c+K\cdot\Delta\vec{v}_c+K\cdot\mathrm{grad}(\mathrm{div}\,\vec{v}_c)\end{cases}, \tag{6}$$

где ρ_c - средняя плотность сыпучей среды;

$\vec{v}_c$ - вектор средней скорости частиц сыпучей среды;

$\vec{F}_c$ - суммарная средняя внешняя сила, действующая на частицы сыпучей среды, отнесенная к единице объема;

P_c - среднее статистическое давление сыпучей среды [9];

K - кинетический коэффициент (макровязкость) сыпучей среды, то есть коэффициент внутреннего сопротивления сыпучей среды;

$\nabla=\vec{i}\dfrac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\dfrac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\dfrac{\partial}{\partial z}$ - символ оператора градиента;

$\Delta=\dfrac{\partial^2}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$ - символ оператора Лапласа.

В случае, если сыпучая среда несжимаемая ρ_c=const, уравнения (6) примут вид:

$$\begin{cases} \operatorname{div}\vec{v}_c=0 \\ \dfrac{\partial \vec{v}_c}{\partial t}+(\vec{v}_c\nabla)\vec{v}_c=\dfrac{1}{\rho_c}\vec{F}_c-\dfrac{1}{\rho_c}\operatorname{grad}P_c+K\cdot\Delta\vec{v}_c \end{cases} \qquad (7)$$

Уравнения (6) или (7) по форме совпадают с уравнениями Навье-Стокса для вязкой сжимаемой и несжимаемой жидкости [8].

Отличие этих уравнений от уравнений вязкой жидкости заключается в величине и физической сущности кинетического коэффициента (макровязкости) K. Этот коэффициент характеризует перенос количества движения в сыпучей среде за счет случайных движений частиц. Для разреженной сыпучей среды этот перенос осуществляется переходом самих частиц в соседний слой среды. При движении плотных сыпучих сред, когда расстояние между частицами соизмеримо с их размерами, перенос количества движения осуществляется за счет столкновений между частицами.

Согласно кинетической теории этот коэффициент определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{3}\overline{v'^2}\,\tau_p. \tag{8}$$

Время релаксации τ_p в этой формуле в случае движения разреженной сыпучей среды, как и в разреженных газах, соизмеримо со средним временем свободного пробега частицы [9]. Для плотного движения сыпучей среды время релаксации соизмеримо с периодом пульсаций случайной составляющей движения частиц или обратно пропорционально частоте этих пульсаций.

Следовательно, на основе кинетической теории Л. Больцмана получены уравнения движения сыпучей среды на гидродинамической стадии описания системы. Получена формула кинетических коэффициентов (макровязкости) сыпучей среды, связывающая микропараметры сыпучего груза с его макродвижением (осредненным движением).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. - М.: Машиностроение, 1964. - 252 с.

2. Севидж С., Джеффри Д. Тензор напряжений в потоке гранулированной среды при высоких скоростях сдвига // Сб. Механика гранулированных сред, N 36. Под ред. А.Ю. Ишлинского - М.: Мир. 1995.- 279 с.

3. Сакович В.Л., Кукса В.П. Исследование процесса загрузки ленточных конвейеров // Горные, строительные и дорожные машины.- Киев: Техника, 1968. - Вып. 6 - С. 98 - 104.

4. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. - М.: Наука, 1990. - 272 с.

5. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. - М.: Из-во Московского унив. 1989. - 240 с.

6. Ван Камен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии. - М.: Высшая школа, 1990. - 376 с.

7. Чемпен С., Каулинг Г. Математическая теория неоднородных газов. - М.: Изд-во иностр. литер. 1960. - 510 с.

8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов. - М.: Наука. 1973. - 848 с.

9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Т. II М.: Наука, 1979.-552с.

УДК 622.647.2

Е.Г. Петришина, Г.В. Кучер

ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ТРУБЧАТОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Розроблено діючу модель трубчастого стрічкового конвейєру, приведено основні висновки та результати експериментальних досліджень моделі. Бібліогр.: 2 найм.

Резко возросшие в последнее время требования защиты окружающей среды привели к новому витку развития конвейерных систем за рубежом в направлении закрытого транспортирования материалов. Проведенный анализ мирового опыта позволил систематизировать и обобщить теоретические и экспериментальные материалы, опыт проектирования и эксплуатации трубчатого ленточного конвейера как одного из представителей конвейерных систем закрытого транспортирования. В настоящее время, несмотря на имеющиеся изобретения, в Украине и в странах СНГ нет промышленного образца трубчатого ленточного конвейера.

Трубчатый ленточный конвейер, являясь экологически чистым транспортным средством, нашел применение в различных областях промышленности для перемещения сыпучих, мелко- и среднекусковых материалов, таких как уголь, мел, известняк, песок, пустая порода в условиях шахт и карьеров; горячий цементный клинкер, хвосты обогащения в условиях цементных предприятий и обогатительных фабрик [1]. Он позволяет изолировать материал от атмосферного воздействия,