



Антипин Владимир Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры ТТМ и ЭМ СГУПС, читает курс лекций по теплофизике и теплогазоснабжению. Родился в 1953 г. В 1976 г. закончил Ленинградский технологический институт им. Ленсовета, затем работал преподавателем в Красноярске в Сибирском технологическом институте, научным сотрудником в Институте химии СО РАН, с 1986 г. работает в Новосибирске, в Институте теплофизики СО РАН, где защитил кандидатскую диссертацию.

В круг научных интересов входит теплосбережение ограждающих конструкций, системы отопления с поквартирным учетом тепла, волновые процессы в многофазных средах, пневматические методы рыхления сыпучих материалов.



Мухин Валентин Александрович окончил Московский энергетический институт в 1956 г. по специальности «Инженерно-физическая теплотехника».

Доктор технических наук, профессор кафедры ТТМ и ЭМ. Область научных интересов — исследование процессов тепло-массообмена в тепловых машинах и аппаратах, имеет 110 опубликованных работ, в том числе 8 авторских свидетельств и патентов.

УДК 621.867.82

В. А. АНТИПИН, В. А. МУХИН

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЫХЛЕНИЯ

В статье изложены физические основы процесса рыхления порошкообразных материалов методом сброса давления. Приведена математическая модель начала отрыва слоев слежавшегося материала, в основе которой лежит процесс нелинейной фильтрации воздуха из порового пространства. Результаты расчетов могут быть использованы для расчета устройства рыхления слежавшихся остатков в вагонах-цистернах и автомобилях-цементовозах.

В процессе транспортировки и хранения порошкообразных материалов происходит их уплотнение и слеживание. В таких материалах, как известковая мука, цемент, глинозем, силы сцепления (адгезии) при длительном хранении и перевозке возрастают на два-три порядка. Тем не менее, в материалах между частицами остается поровое пространство пустот, составляющее 40–50 % от общего объема. Наличие пустот между частицами позволяет закачивать туда газ (воздух) под давлением, затем использовать энергию сжатого газа, находящегося в поровом пространстве, на разрыв связей между частицами и рыхление порошкообразного материала.

Если в герметичную емкость с порошкообразным материалом закачать сжатый воздух, через некоторое время поры материала насытятся воздухом до давления P_1 . Затем емкость сверху разгерметизируем. Над поверхностью материала давление станет меньше, чем в самом материале. Из пор газ будет выфильтровываться вверх, при этом волна разрежения ВР будет двигаться в противоположном направлении, вниз. За ВР материал будет расширяться и рыхлиться. Этот процесс представлен на рис. 1. Более темная зона 1 — уплотненный материал, светлая 2 — разрыхленный.

Рассмотрим физику рыхления порошкообразного материала в волне разрежения. Напряжения в материале по вертикальной оси можно записать следующим образом:

$$\sigma_x = \rho_{\text{см}} g x + \sigma_{\text{сц}},$$

где x — высота слоя от поверхности засыпки, м; $\rho_{\text{см}}$ — насыпная плотность материала, кг/м³; $\sigma_{\text{сц}}$ — сила сцепления между частицами, Па.

Силы сцепления для порошкового материала определяются опытным путем и в основном зависят от давления или высоты насыпного слоя и времени слеживания.

Для смещения и разрушения слоя необходимо приложить градиент давления, превышающий силы сцепления и вес слоя:

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx \geq \sigma_x.$$

Градиент давления в слое формируется за счет быстрого падения давления над поверхностью материала в воздухе и в дальнейшем — фильтрации воздуха из пор вверх в сторону низкого давления. В некоторый момент времени t^* градиент давления достигнет величины сил сцепления и произойдет отрыв слоя толщиной x^* . Условие отделения слоя материала можно продемонстрировать на графике рис. 2. Полное условие отрыва слоя и его движения запишется в виде:

$$\rho_{\text{см}} g x + \sigma_{\text{сц}} = \int_0^{x^*} \frac{\partial p(x, t^*)}{\partial x} dx;$$

$$\rho_{\text{см}} g = \frac{\partial p(x^*, t^*)}{\partial x}.$$

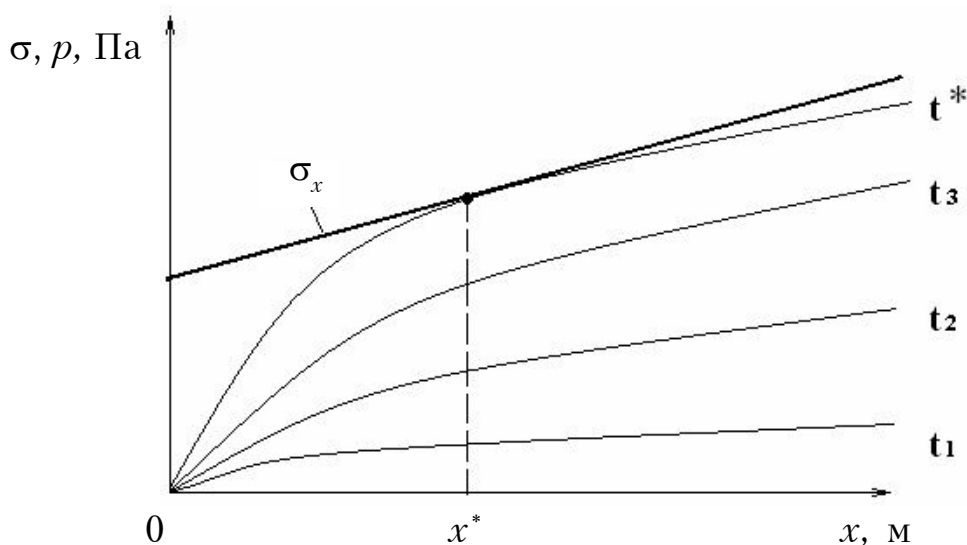


Рис. 2. Условие отрыва слоя материала. Градиент давления Δp за время t^* достигает прочности слоя x^* , происходит отрыв слоя. Как следует из графика, при более быстром изменении давления слой будет тоньше

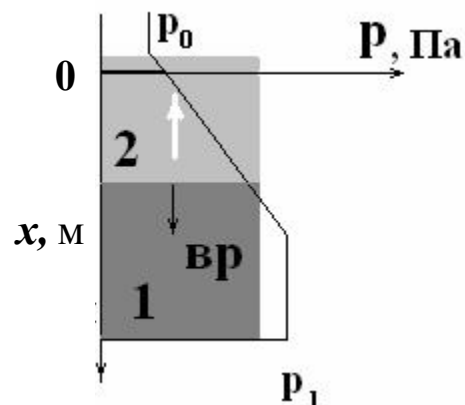


Рис. 1. Схема формирования волны разрежения. Стрелкой вверх обозначено движение фильтрующегося воздуха. p_1 — начальное давление; p_0 — атмосферное давление

Как показывают опыты, в зависимости от скорости падения давления над поверхностью материала dp/dt отрыв слоев материала происходит по-разному, причем толщина слоев уменьшается с увеличением скорости падения давления.

Для решения задачи отрыва следует найти градиенты давления, другими словами, решить задачу нестационарной фильтрации газа в еще неподвижном слое:

$$\frac{\partial(p\varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((ap) \frac{\partial p}{\partial x} \right),$$

где ε — порозность или объемная доля пустот порошкообразного материала; a — коэффициент фильтрации, $\text{м}^2/(\text{Па}\cdot\text{с})$.

Уравнение решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$P(x,0) = p_1 a - \text{const}; \quad \varepsilon - \text{const}.$$

Наибольшая скорость сброса давления достигается в конструкции емкости типа ударная труба, когда сброс давления над материалом происходит за счет разрыва диафрагмы. При этом над материалом в воздухе формируется центрированная волна разрежения, проникающая в него сверху вниз. В порошкообразном материале ВР движется с равновесной скоростью звука $c = (p/\varepsilon\rho_{\text{см}})^{0,5}$, в материале образуются наибольшие градиенты, и он рыхлится на максимально мелкие частицы. Равновесная скорость составляет 10–20 м/с, что позволяет интерпретировать материал как тяжелый газ с насыпной плотностью порошкового материала.

Следует заметить, что с увеличением размера частиц до 0,1 мм начинают проявляться их инерционные свойства: возрастает время механической релаксации частиц, скорость ВР возрастает и лежит между равновесной и замороженной — скоростью звука в воздухе. Градиенты давления уменьшаются, что снижает эффективность рыхления на крупных частицах.

В емкости железнодорожной цистерны максимальное давление не может превышать 0,2 МПа, что ограничено ее прочностью. Скорость набора давления зависит от мощности компрессора и степени герметичности емкости. Таким образом, скорость сброса давления будет определяться площадью сечения отверстия клапана верхнего люка, через которое возможно соединение внутренней полости с атмосферой. При перепаде давления в 0,1 МПа истечение будет докритическим, а скорость истечения будет определяться по известным формулам истечения газа, соответственно массовый расход M :

$$M = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где f — площадь сечения клапана, м^2 ; k — показатель адиабаты, для воздуха $k = 1,4$; ρ_1 — плотность воздуха в емкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Скорость падения давления в газе определим для изотермического случая, в пренебрежении притоком за счет фильтрации. Из уравнения состояния идеального газа:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dm}{dt} \frac{RT}{V} = M \frac{RT}{V},$$

где R — газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T — температура воздуха, К ; V — объем воздуха в емкости над засыпкой, м^3 .

Очевидно, что скорость падения давления над засыпкой должна превышать скорость формирования градиента фильтрации в слое:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{\text{верх}} \geq c \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\text{слой}}.$$

В качестве устройства для быстрого сброса давления в емкости был опробован пробковый кран с проходным отверстием 200 мм, установленный на люк цистерны (рис. 3). В цистерне находились остатки известковой муки между перфорированными откосами. После проведенной процедуры остатки были удалены через нижний сливной люк.

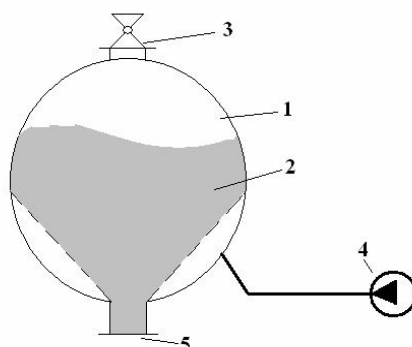


Рис. 3. Схема реализации способа рыхления в герметичной цистерне:
1 — цистерна; 2 — порошкообразный материал; 3 — пробковый кран; 4 — компрессор;
5 — нижний фланец выгрузки

Такой способ рыхления может быть эффективен при ликвидации завалов в пневмопроводах, работающих периодически на подъездных путях. Для этого на трубопровод следует установить запорный клапан, позволяющий периодически насыщать материал сжатым воздухом, а затем сбрасывать давление в сторону трубопровода, свободного от материала.

Литература

1. Антипин В.А., Борисов А.А., Трунев А.П. Динамические процессы в свободных засыпках в режимах фильтрации газа при внезапном сбросе давления // ПМТФ. 1990. № 6. С. 80–89.
2. Антипин В.А. Конвективная нелинейность волны разрежения в дисперсных материалах // Теплофизика и аэромеханика. 1997. № 4. С. 447–450.
3. Островский Г.М. Пневматический транспорт в химической промышленности. Л.: Химия, 1984. 103с.
4. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975. 323 с.