

УДК 621.867.82

*В.М. Гущин, канд. техн. наук, доцент ДГМА,  
О.В. Гущин, канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ В РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ АЭРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПЛОШНЫМ ПОТОКОМ

Анализ выполненных исследований пневматического транспорта сыпучих материалов во взвешенном состоянии в режиме полета одиночных частиц показал достаточно высокую степень изученности установок данной группы [1,2]. Определенные положительные результаты достигнуты в разработке пневмотранспорта, работающего в порционном режиме движения аэросмесей [3,4]. Достаточно подробно описаны процессы псевдооживления легкоподвижных сыпучих материалов, определены условия формирования аэрированных потоков [5,6].

Анализ выполненных теоретических и экспериментальных исследований показал, что рабочие процессы пневмотранспортных установок, работающих в режиме движения сыпучих материалов в аэрированном состоянии сплошным потоком применительно к условиям промышленности строительных материалов, практически не изучены.

Практически малоисследованными являются основные технические характеристики, и параметры данной разновидности пневмотранспорта, как известно, обладающего рядом достоинств. К последним следует отнести: высокую массовую концентрацию аэросмеси, относительно невысокий расход энергии на процесс транспортирования, малый расход воздуха, относительно несложную очистку воздуха от частиц сыпучего материала.

Целью данной работы является определение основных параметров пневмотранспортной установки, работающей в режиме движения сплошным потоком мелкодисперсных хорошо сыпучих материалов, используемых в строительной промышленности.

Изучение режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе [7] наглядно свидетельствует (рис.1), что при режиме движения частиц сплошным потоком в аэрированном состоянии объемная, а следовательно и массовая концентрация смеси практически достигают своих предельных значений.

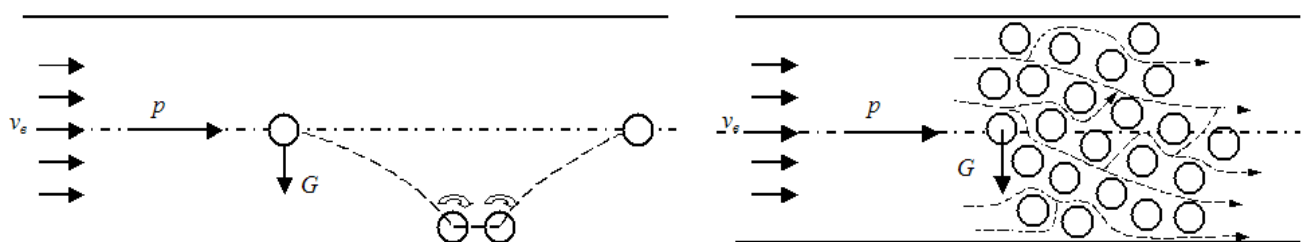


Рисунок 1. Схема движения частиц сыпучего материала в пневмотранспортном трубопроводе:  
а - движение одиночной частицы во взвешенном состоянии; б - движение частиц в сплошном аэрированном потоке.

Так как в исследуемом режиме движения аэросмеси сыпучий материал распределён относительно равномерно по поперечному сечению и вдоль трубы (рис. 1б), можно считать правомерным рассмотрение одномерного течения гомогенной структуры в трубопроводе на основе уравнений механики сплошной среды, выражающих законы сохранения массы (уравнения неразрывности), количества движения (уравнение движения) и энергии [8].

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho d\tau ; \quad (1)$$



$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{w} d\tau = \oint_{\Omega} \mathbf{P}_n d\sigma + \int_V \rho \mathbf{F} d\tau; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( \varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) d\tau = \oint_{\Omega} \mathbf{P}_n \cdot \mathbf{w} d\sigma + \int_V \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{w} d\tau + \oint_{\Omega} q_n d\sigma, \quad (3)$$

где  $V(d\tau)$  – произвольный объем сплошной среды, состоящей из одних и тех же частиц;  $\Omega(d\sigma)$  – поверхность, ограничивающая этот объем;  $\rho$  – плотность газа;  $\mathbf{w}$  – скорость газа;  $\mathbf{P}_n$  – вектор напряжений на площадке с нормалью  $\mathbf{n}$ ;  $\mathbf{F}$  – плотность массовых сил;  $\varepsilon$  – внутренняя энергия единицы массы газа;  $q_n$  – нормальная составляющая вектора потока тепла

Преобразуя поверхностные интегралы в формулах (1...3) в интегралы по объему  $V$  с помощью формулы Гаусса-Остроградского, получаем

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho d\tau = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{w} d\tau = \int_V \operatorname{div} \mathbf{P} d\tau + \int_V \rho \mathbf{F} d\tau; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \left( \rho \varepsilon + \frac{\rho w^2}{2} \right) d\tau = \int_V \operatorname{div} (\mathbf{P} \mathbf{w}) d\tau + \int_V \operatorname{div} \mathbf{q} d\tau + \int_V \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{w} d\tau, \quad (6)$$

где  $\mathbf{P}$  – тензор напряжений в сплошной среде;  $\mathbf{P} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}$  (здесь  $p$  – давление газа;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $\mathbf{T}$  – тензор касательных напряжений).

Используя формулу дифференцирования во времени интеграла с переменными пределами интегрирования  $\frac{d}{dt} \int_V A d\tau = \int_V \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \operatorname{div} A \mathbf{w} \right) d\tau$ , при произвольно выбранной области интегрирования уравнения (4...6) равносильны дифференциальным уравнениям:

$$\begin{array}{l} \text{неразрывности} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{w} = 0; \end{array} \quad (7)$$

$$\begin{array}{l} \text{движения} \\ \frac{\partial \rho \mathbf{w}}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{w} \otimes \mathbf{w} + p\mathbf{I}) = \operatorname{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{F}; \end{array} \quad (8)$$

$$\begin{array}{l} \text{энергии} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \varepsilon + \frac{\rho w^2}{2} \right) + \operatorname{div} \left[ \left( \rho i + \rho \frac{w^2}{2} \right) \mathbf{w} \right] = \operatorname{div} (\mathbf{T} \mathbf{w} + \mathbf{q}) + \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{w}, \end{array} \quad (9)$$

где  $i = \varepsilon + p/\rho$  – энтальпия среды, а знак  $\otimes$  – диадное произведение векторов.

Рассматривается движение одномерного потока гомогенной структуры в пневмотранспортном трубопроводе. В качестве координатной оси выбрана ось трубопровода. Остальные оси расположены в плоскости, перпендикулярной оси трубы.

Воспользовавшись операцией

$$A(x, t) = \langle A(x, y, z, t) \rangle = \frac{4}{\pi d^2} \int_S A(x, y, z, t) d\sigma, \quad (10)$$

(где  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода;  $d$  – диаметр трубы) Осреднённые по сечению трубы уравнения одномерного течения примут вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( p + \beta \rho w^2 \right) = \frac{4}{d} \tau + \rho F_x; \quad (12)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \langle \mathbf{T} \nabla \mathbf{w} \rangle + \frac{4}{d} q_n + \frac{\partial q_x}{\partial x}; \quad (13)$$

$$Q = \rho w, \quad (14)$$

где  $Q(x,t)$  – расход газа;  $w$  – средняя скорость газа;  $\tau$  – среднее касательное напряжение на внутренней поверхности трубопровода;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей газа по сечению трубы (для развитых турбулентных течений  $\beta \approx 1$ );  $q_n$  – осредненный по периметру тепловой поток;  $q_x$  – тепловой поток вдоль оси трубы.

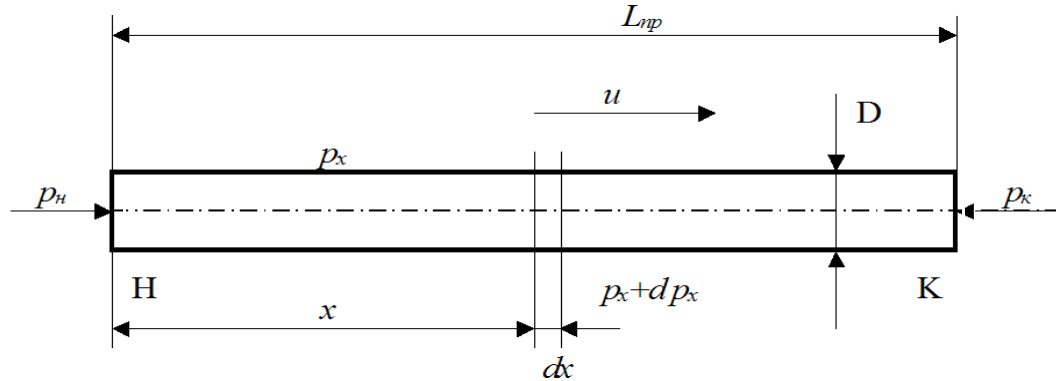


Рисунок 2. Схема к расчету потерь давления в пневмотранспортном трубопроводе.

При осреднении приняты допущения: плотность газа, его давление, температура и внутренняя энергия не изменяются по сечению трубы; сжимаемость газа намного больше упругости стенок трубы, так что последней можно пренебречь; на внутренней поверхности трубопровода скорость газа равна нулю.

Для замыкания системы уравнений с целью компенсации потерянной при осреднении информации вводятся дополнительные допущения: касательное напряжение на внутренней поверхности трубы связано со средними параметрами течения зависимостью Дарси [10]; скорость движения газа мала по сравнению с характерной скоростью звука в газе, т.е. малые числа Маха; тепловой поток вдоль оси трубы  $q_x$  мал по сравнению с потоком тепла в перпендикулярном направлении и он не учитывается; рассматриваемый газ в условиях низконапорных пневмотранспортных установок считается совершенным. Тогда уравнение состояния можно записать

$$p = \rho RT,$$

а выражение для термодинамических функций запишутся:

$$\varepsilon = c_v T + const; \quad i = c_p T + const,$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $c_v$ ,  $c_p$  – удельные теплоемкости изохорного и изобарного процессов соответственно;  $T$  – температура газа.

С учетом сделанных допущений система уравнений (11...14) и добавочные условия для  $p$  и  $\varepsilon$  представляются в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho w}{2}; \quad (16)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \lambda \frac{1}{d} \frac{\rho w^3}{2} + \frac{4q_n}{d}; \quad (17)$$

$$p = \rho RT; \quad \varepsilon = c_v T + const; \quad Q = \rho w. \quad (18)$$

Полученная система уравнений (15...18) представляет совокупность шести уравнений для определения шести неизвестных функций  $\rho$ ,  $p$ ,  $w$ ,  $Q$ ,  $T$  и  $\varepsilon$ .

Уравнения притока тепла (третье уравнение системы) с учетом второго уравнения (уравнения движения) после преобразований, находится



$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + Q c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{4q_n}{d}. \quad (19)$$

Полная система уравнений для определения четырех неизвестных функций  $\rho(x, t)$ ,  $p(x, t)$ ,  $Q(x, t)$  и  $T(x, t)$  имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda \frac{1}{2d} \frac{Q|Q|}{\rho}; \quad (21)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + Q c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{4q_n}{d}; \quad (22)$$

$$p = \rho RT. \quad (23)$$

Так как температура газа не отличается от температуры окружающей среды, исключая из уравнения неразрывности плотность, с помощью уравнения состояния система уравнений для рассматриваемого случая принимает вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (24)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda c^2}{2\gamma d} \frac{Q|Q|}{p}. \quad (25)$$

Система уравнений относительно двух функций: давления  $p(x, t)$  и расхода  $Q(x, t)$  является исходной для расчета пневмотранспортных установок, работающих при движении аэросмеси сплошным аэрированным потоком.

Представив

$$\varphi(p, Q) = -\frac{\lambda c^2}{2\gamma d} \frac{Q|Q|}{p}, \quad (26)$$

уравнения (24,25) принимают вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (27)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = \varphi(p, Q), \quad (28)$$

где  $c^2 = \gamma RT$ , а  $\varphi(p, Q)$  определена равенством (26).

Для решения данных дифференциальных уравнений используется метод характеристик [11] (рис.3...4).

Значение давления  $p$  и расхода  $Q$  в произвольной точке  $M$  плоскости переменных  $x$  и  $t$ , являющейся вершиной треугольника  $AMB$ , находятся по формулам:

$$p_M(x, t) = \frac{P_A + P_B}{2} + c \frac{Q_A - Q_B}{2}; \quad (29)$$

$$Q_M(x, t) = \frac{P_A - P_B}{2c} + \frac{Q_A + Q_B}{2}. \quad (30)$$

Так как значения давления и расхода при  $t = 0$  известны:

$$p(x, 0) = p_{нач}(x); \quad Q(x, 0) = Q_{нач}(x), \text{ то}$$

$$p_k^m = \frac{P_{k-1}^{m-1} + P_{k+1}^{m-1}}{2} + c \frac{Q_{k-1}^{m-1} - Q_{k+1}^{m-1}}{2} + \frac{\varphi_{k-1}^{m-1} - \varphi_{k+1}^{m-1}}{2} \Delta x; \quad (31)$$

$$Q_k^m = \frac{P_{k-1}^{m-1} - P_{k+1}^{m-1}}{2c} + \frac{Q_{k-1}^{m-1} + Q_{k+1}^{m-1}}{2} + \frac{\varphi_{k-1}^{m-1} + \varphi_{k+1}^{m-1}}{2} \Delta x. \quad (32)$$

Блок - схема решения представлена на рис.5.

Машинный эксперимент по исследованию взаимосвязи основных технических параметров пневмотранспортной установки, работающей в режиме движения аэросмеси сплошным аэрированным потоком, выполнен с использованием MAPLE – программы “HYDRO”, [12]. Основные данные машинного эксперимента представлены на рис. 6...8.

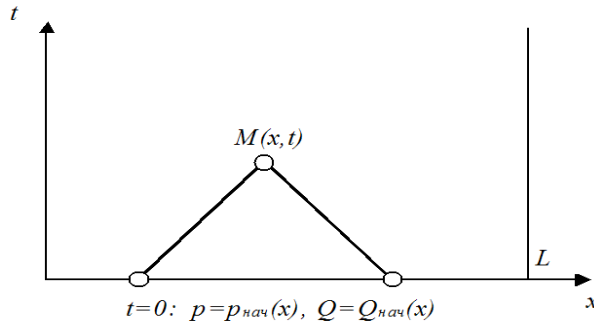


Рисунок 3. Схема определения параметров точки  $M$  методом характеристик.

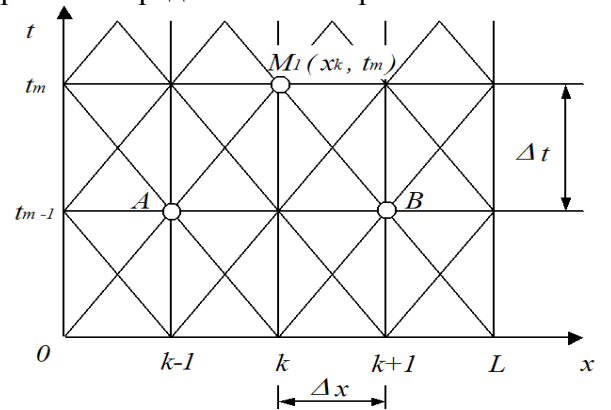


Рисунок 4. Сетка характеристик для численного решения системы уравнений.

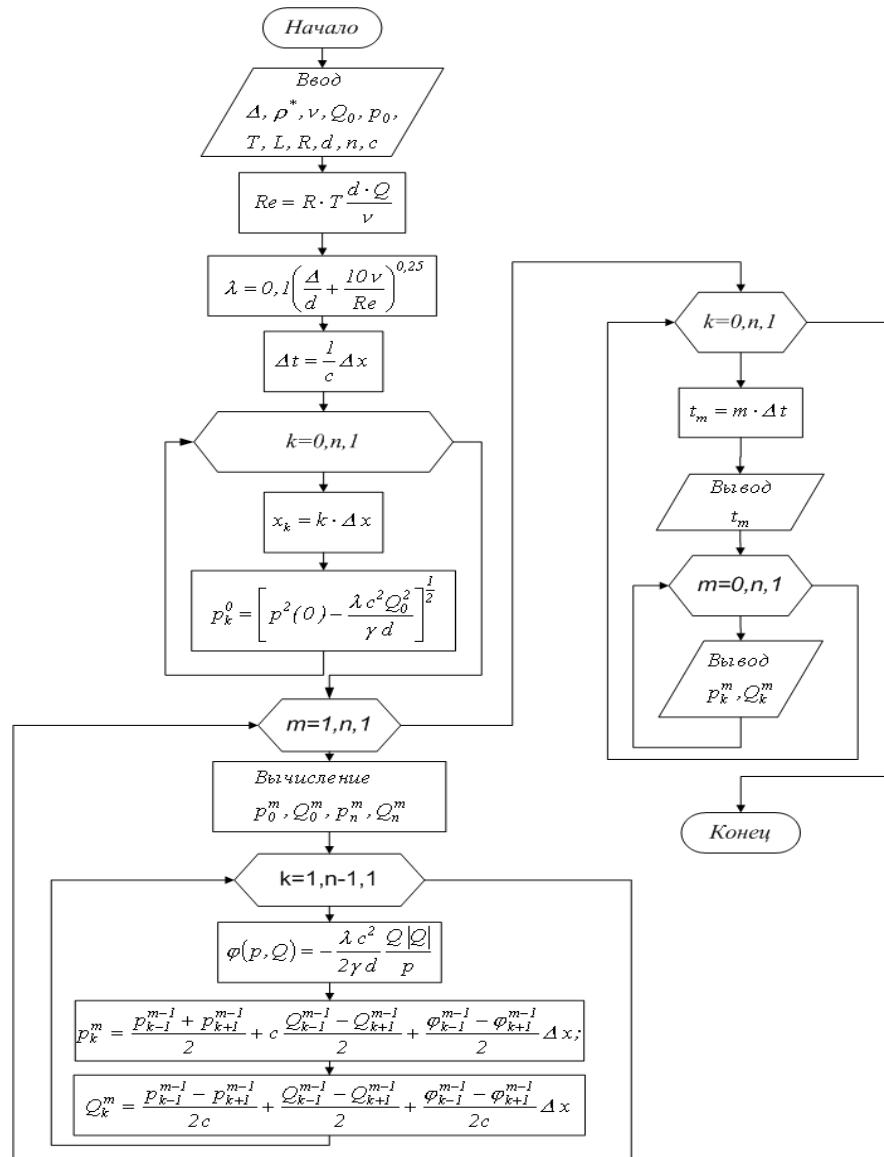


Рис.5. Блок - схема алгоритма решения задачи.



Графики зависимости давления на начальном участке трубопровода (рис. 6а, 7а) показывают, что в начальном периоде идёт резкое возрастание давления, достигающее максимума на длине участка 0,5...2 м от пункта загрузки, затем давление падает, достигая своего номинального значения на расстоянии около 4м от точки начала движения аэросмеси. Скорость скачкообразно возрастает, достигая своего номинального значения 6 м/с (рис. 6б, 7б). На этих графиках хорошо видны экстремальные точки, соответствующие расстоянию 0,5; 2,0 и 4 м от исходной нулевой точки графика изменения давления в зависимости от дальности транспортирования (рис. 8а) и плотности транспортируемого материала (рис. 8б), которые характерны для пневмотранспорта различных модификаций, но имеют свои конкретные данные, присущие данному способу движения аэросмесей. Изменения давления от скорости потока показывают, что скорость движения порядка 3...5 м·с<sup>-1</sup> находится в области минимальных энергетических затрат.

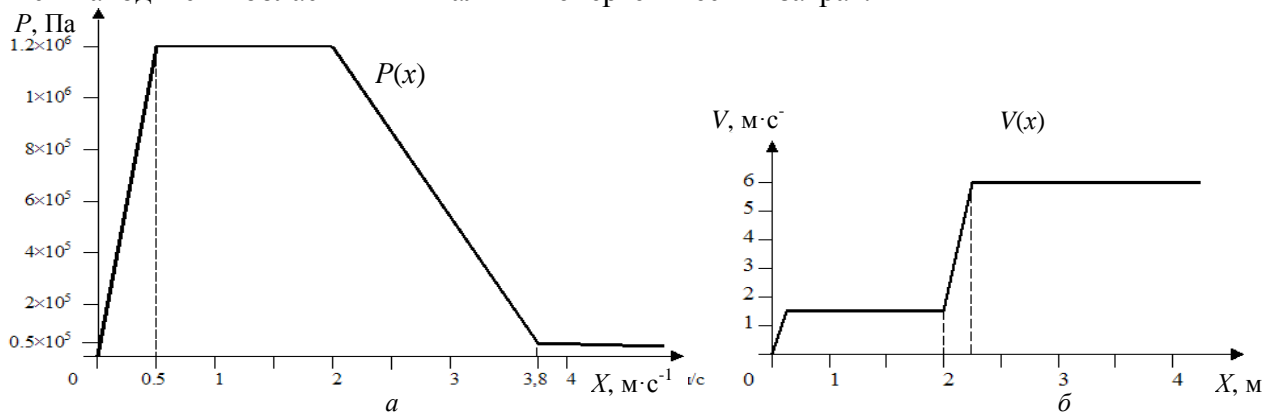


Рисунок 6. Зависимости давления (а) и скорости (б) от расстояния при установившемся движении.

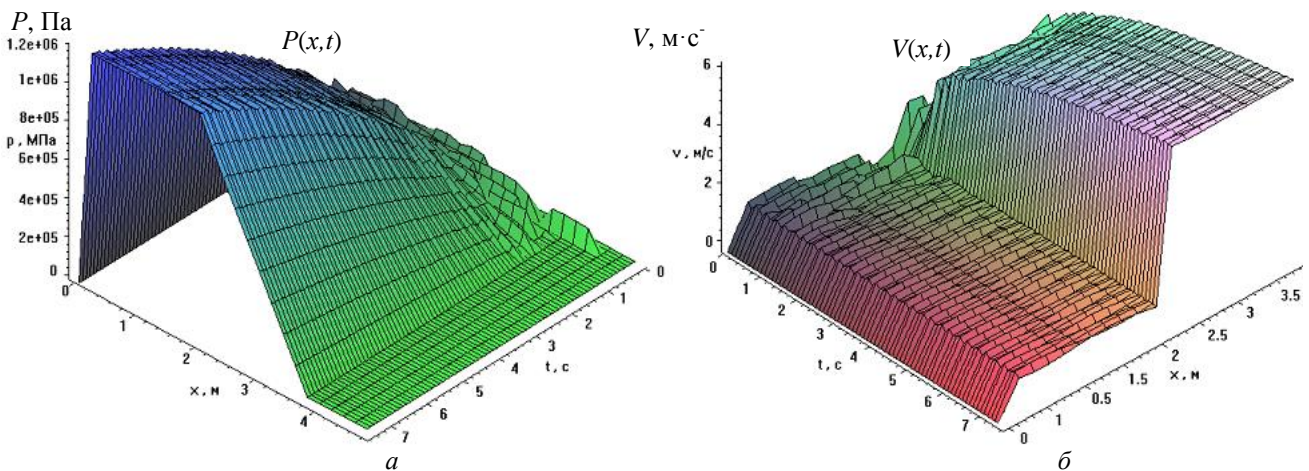


Рисунок 7. Распределение давления (а) и скорости движения аэросмеси (б) в трехмерных координатах.

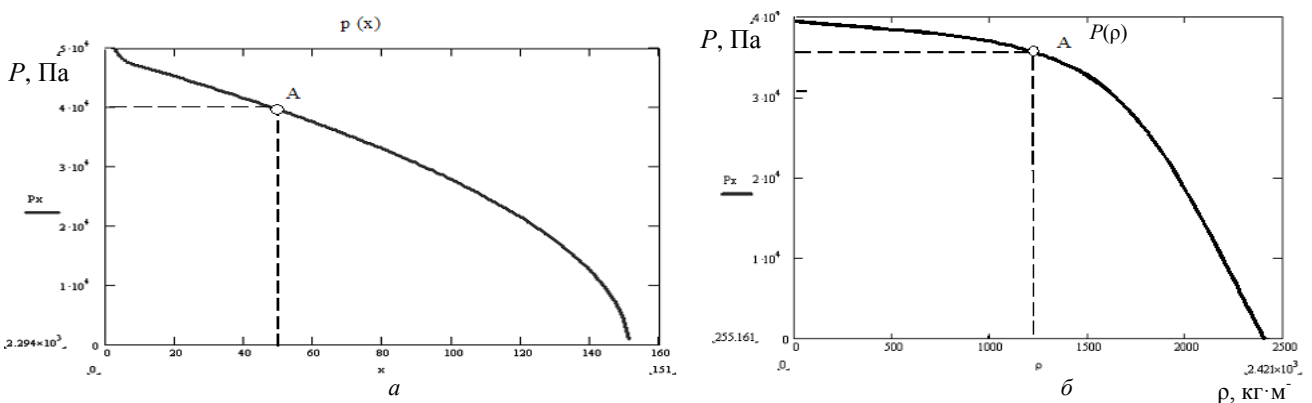


Рисунок 8. Изменение основных параметров пневмотранспортной установки:

а – падение давления от дальности транспортирования; б – падение давления от плотности материала.

Сделана попытка оценить влияние шероховатости внутренней поверхности труб ( $\Delta_i$ ) на величину избыточного давления в пневмотранспортном трубопроводе.

*Выводы:*

1. Разработана математическая модель движения аэрированной смеси сплошным потоком в пневмотранспортном трубопроводе при перемещении легкоподвижных хорошо сыпучих материалов.

2. Приведены основные результаты машинного эксперимента с использованием MAPLE – программы «HYDRO», свидетельствующие о достаточно высоких характеристиках пневмотранспортной установки данного типа.

3. Полученные данные могут быть использованы для практических целей при проектировании пневмотранспортных установок.

*Литература*

1. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт/ А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. - 293с. – ISBN 000-000-000-000-0.
2. Волошин, А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов/ А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 2001. - 519 с. – ISBN 966-00-0539-3.
3. Гуцин, В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів/ В.М. Гуцин// *Машинознавство*, 2000, №2(23). – С.39-43.
4. Сивко, В.И. Определение потерь давления в пневмотранспортном трубопроводе/ В.И. Сивко, О.В. Гуцин// *Техніка будівництва*. – К.: КНУБА. – 2006. № 18. – С.50-56.
5. Разумов, И.М. Псевдооживление и пневматический транспорт сыпучих материалов/ И.М. Разумов. – М.: Химия, 1984. – 346с. – ISBN 000-000-000-000-0.
6. Островский, Г. М. Прикладная механика неоднородных сред/ Г.М. Островский. – СПб.: Наука, 2000. – 359 с. – ISBN 000-000-000-000-0.
7. Гуцин, В.М. Режимы движения двухкомпонентной среды в транспортном трубопроводе/ В.М. Гуцин// *Геотехнічна механіка: Між від 3б. наук . праць/ ІГТМ НАН України*. Дн-ськ, 1999. – Вип. 13. – С.71-76.
8. Седов, Л.И. Механика сплошной среды/ Л.И. Седов. – М. : Наука, 1970. – 351 с. – ISBN 000-000-000-000-0.
9. Чарный, И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах/ И.А. Чарный. – М.: Госитеорздат, 1951. – 223с. – ISBN 000-000-000-000-0.
10. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов/ Л.Г. Лойцянский. 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с., 311 ил., 22 табл. – ISBN 5-7107-6327-6.
11. Александров, А.М. Контейнерный трубопроводный пневмотранспорт/ А.М. Александров, В. Е. Аглицкий. – М.: Машиностроение, 1979. – 263с. – ISBN 000-000-000-000-0.
12. Аладьев, В.З. Maple 6: Решение математических, статистических и физико-технических задач/ В.З. Аладьев, М.А. Богдьявичус. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 824 с. – ISBN 5-93208-085-X.