

Аэродинамические модели с сосредоточенными параметрами лавы шахтной вентиляционной сети

Лапко В.В., Чередникова О.Ю.
кафедра ЭВМ ДонНТУ, ola@cs.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Lapko V.V., Cherednikova O.Y. Aerodynamic models of mine ventilation network longwalls with lumped parameters. Equations describing transients in airflows of mine ventilation network longwalls have been obtained for general and approximate dynamic model. Transients in longwalls have been studied both analytically and by simulation taking into account friction losses. Approximate dynamic model of minimal complexity proved to be usable for describing transients in longwalls under certain conditions.

Введение

Основными объектами шахтной вентиляционной сети являются рабочие зоны добычи угля – выемочные участки, включающие ряд воздухоподающих ветвей сети: откаточный штрек, лаву и вентиляционный штрек. В реальных шахтных условиях из этих ветвей наиболее специфичными свойствами обладает воздушный поток в лаве [1]. Во-первых, в реальных условиях протяженность этой ветви существенно меньше длины двух других выработок. При этом с учетом верхней частоты спектра производственных аэродинамических возмущений в шахтной сети [2,8] лава является также короткой выработкой в аэродинамическом отношении, поскольку ее длина, по крайней мере, в 20 раз короче длины бегущей аэродинамической волны, обусловленной реальным спектром аэродинамических возмущений в шахтной сети. Кроме того, площадь сечения лавы практически в два-три раза меньше остальных ветвей. Поэтому ее волновое сопротивление [2] существенно превышает волновое сопротивление сопряженных с ней ветвей сети. В связи с этим лава в сети представляет воздуховод, не согласованный как по входу, так и по выходу, что, естественно, может приводить к сложному характеру динамики воздушного потока в лаве и требует тщательной отработки модели воздушного потока лавы. Отличительной особенностью лавы является также большое аэродинамическое сопротивление, которое на порядок больше сопротивления других ветвей сети. Поэтому затухание переходных процессов в лаве играет более значительную роль по сравнению с другими воздухоподающими выработками. Однако, в известных работах по исследованию аэродинамических моделей шахтных выработок [2,3] модель лавы с учетом ее специфических характеристик не рассматривалась. В силу этого актуальной задачей является обоснование минимальной по сложности

структуры аэродинамической модели лавы как динамически короткой ветви шахтной сети, обладающей специфическими аэродинамическими и акустическими параметрами.

Математическое описание аэродинамических процессов в лаве

Как известно [2], для реального спектра аэродинамических возмущений в шахтной сети, верхняя граница которого не превышает 0.08 Гц, все ветви сети короче 300м, к которым заведомо относится и лава, представляют аэродинамически короткие выработки и их динамика с достаточной для практики точностью в общем случае описываются L-C фильтром [2]. В силу этого в качестве эталонной модели, адекватно описывающей динамику лавы, может быть использован T-образный четырехполюсник, согласованный по входу и выходу (рис.1). Используя L-C фильтр в качестве эталонной модели динамики воздушного потока лавы, определим условия, при которых сжимаемостью воздушного потока в лаве можно пренебречь и свести модель переходных процессов в лаве к L-фильтру (рис.2), который широко используется в настоящее время для приближенного описания аэродинамических процессов в лаве [3,4].

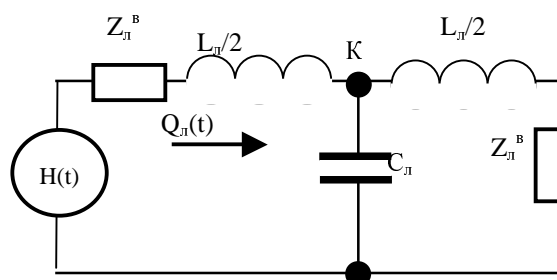


Рисунок 1 – Динамическая модель лавы как короткой выработки шахтной сети с учетом инерционности ($L_{л}$) и сжимаемости ($C_{л}$)

Структура указанной полной модели динамики воздушного потока лавы как динамически короткой выработки (рис.1) включает акустическую массу (L_n) и гибкость (C_n) воздушного потока, определяемых соотношениями [2]:

$$L_n = \rho l_n / F_n; \quad (1)$$

$$C_n = F_n l_n / (\rho a^2), \quad (2)$$

где ρ , F_n , l_n , a – соответственно плотность воздушного потока, сечение лавы, длина лавы, скорость распространения бегущей волны (скорость звука) в воздушном потоке.

Для исследования динамических свойств воздушного потока собственно самой лавы аэродинамические процессы рассмотрим в модели лавы, согласованной по входу и выходу волновым сопротивлением лавы [2]

$$Z_n^B = \rho a / F_n \quad (3)$$

С целью анализа динамических свойств полной (рис.1) и приближенной (рис.2) модели лавы рассмотрим свободное движение воздушного потока в моделях лавы при выключении напора H (рис.1,2).

В общем случае динамика воздушного потока лавы для полной модели (рис.1) описывается передаточной функцией [3,6]

$$\frac{H(s)}{Q_n(s)} = \frac{M(s)}{N(s)}, \quad (4)$$

где $M(s) = s^3 + 4(a/l_n)^2 s^2 + 8(a/l_n)^2 s + 8(a/l_n)^3 = 0$ (5) – характеристическое уравнение свободных движений воздушного потока при выключении напора H .

Для исследования уравнения (5) введем следующие обозначения:

$$A=4(a/l_n)^2; B=8(a/l_n)^2; C=8(a/l_n)^3. \quad (6)$$

Тогда уравнение (5) примет вид:

$$s^3 + As^2 + Bs + C = 0 \quad (7)$$

С целью упрощения решения уравнения (7) представим его в виде:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \quad (8)$$

где $y=s+A/3$; $p=-A^2/3+C$; $q=2A^3/3-AB/3+C$.

После подстановки (6) для коэффициентов уравнения (8) получим выражения:

$$y=s+4/3 a/l; p=(a/l_n)^2/8/3; q=56/27 (a/l_n)^3.$$

В соответствии с алгоритмом решения уравнения (8) вычислим значения переменных[5]:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}; \quad U = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + Q};$$

$$V = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - Q}.$$

Тогда корни уравнения (8) будут иметь вид:

$$y_1=U+V; y_{2,3} = (U+V)/2 \pm i \sqrt{3} (U-V)/2.$$

После преобразования полученных переменных получим:

$$Q = 1.33(a/l_n)^3; U = 0.67(a/l_n); V = -1.32(a/l_n);$$

$$y_{1,2} = -0.65(a/l_n); y_{2,3} = 0.325(a/l_n) \pm i \sqrt{3} (a/l_n).$$

Тогда характеристическое уравнение (5) имеет один действительный и два мнимых корня [3,5]:

$$s_1 = -2(a/l_n),$$

$$s_{2,3} = -(a/l_n) \pm i \sqrt{3} (a/l_n).$$

Таким образом, общее решение свободных движений полной модели имеет вид [5]:

$$Q_n(t) = C_1 e^{-2\frac{a}{l_n}t} + e^{-\frac{a}{l_n}t} [C_2 \sin(\sqrt{3}\frac{a}{l_n}t) + C_3 \cos(\sqrt{3}\frac{a}{l_n}t)] \quad (9)$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные интегрирования.

При начальных условиях в положении равновесия (до выключения напора) $Q_n = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_n'(0) = Q_n''(0) = 0$. Постоянные интегрирования имеют значения:

$$C_1 = 3.33; C_2 = 6.67; C_3 = 0.$$

Тогда (9) может быть представлено в виде [5]:

$$Q_n(t) = A e^{-2\alpha t} + B e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

где $A = C_1$; $B = C_2$; $\varphi = 0$; $\alpha = a/l_n$; $\omega = \sqrt{3} (a/l_n)$.

Переходные процессы собственных движений приближенной модели (рис.2) в общем случае описываются передаточной функцией [3]:

$$\frac{H(s)}{Q_n(s)} = sL_n + 2Z_n^B \quad (11)$$

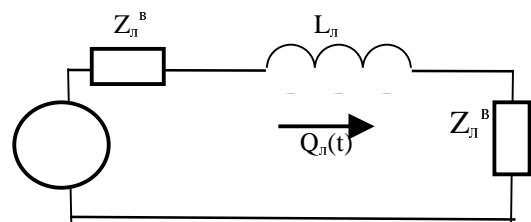


Рисунок 2 – Динамическая модель минимальной сложности воздушного потока лавы без учета сжимаемости воздушного

Следовательно, характеристическое уравнение приближенной модели лавы может быть представлено соотношением

$$Ts + 1 = 0, \quad (12)$$

где $T = 1/2 (l_n/a)$ – постоянная времени переходного процесса упрощенной модели лавы.

Корень этого характеристического уравнения является действительным и имеет вид:

$$S = -2(a/l_n).$$

Следовательно, общее решение свободных движений упрощенной модели имеет вид:

$$Q_n(t) = C e^{-\frac{2a}{l_n}t},$$

где C – постоянная интегрирования.

При начальных условиях в положении равновесия $Q_n = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ постоянная интегрирования $C = 10$.

Для лавы длиной 130м и сечением 3 м^2 решения уравнений (5) и (12) и машинные

графики переходных процессов в полной (рис.1) и упрощенной (рис.2) модели показаны на рис.3.

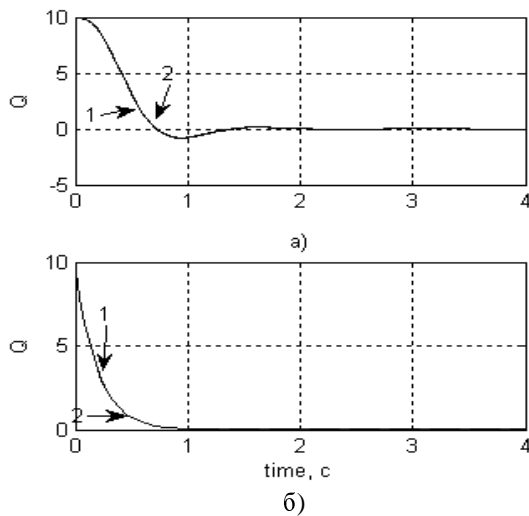


Рисунок 3. – Аналитические решения уравнения динамики и машинные графики переходных процессов в полной (а) и упрощенной (б) схеме замещения (1 – аналитическое решение, 2 – графики машинных экспериментов)

Анализ полученных зависимостей показывает, что процессы в полной и упрощенной модели качественно имеют примерно одинаковый характер. Однако, имеется и ряд отличий. Во-первых, длительность переходного процесса в упрощенной модели меньше длительности переходного процесса эталонной модели. Кроме того, в полной модели имеются, хотя и небольшие, гармонические составляющие, причем круговая частота гармонических составляющих $\omega \approx 4.5 \text{ c}^{-1}$, т.е. находится далеко за пределами спектра производственных возмущений в шахтной сети, ограниченных $\omega \leq 0.5 \text{ c}^{-1}$ [2]. В пределах частотного спектра возмущений в шахтной сети, и следовательно, рабочих частот систем управления вентиляцией графики переходных процессов в полной и упрощенной моделях показаны на рис.4.

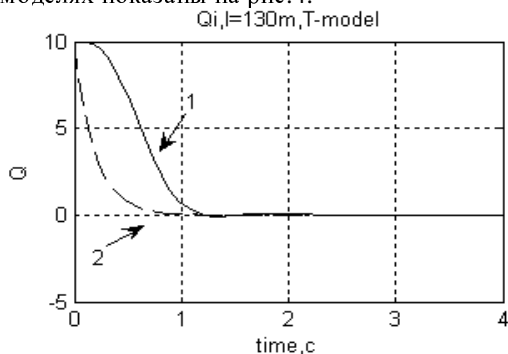


Рисунок 4 – Графики переходных процессов в полной (1) и упрощенной (2) моделях в рабочем диапазоне полосы пропускания систем управления вентиляцией

Таким образом, в рабочем диапазоне частот систем управления компенсации производственных аэродинамических возмущений динамические характеристики лавы для эталонной и приближенной моделей достаточно сильно отличаются как по характеру, так и по длительности переходного процесса.

В силу этого область использования упрощенной модели ограничена теми предметными исследованиями, где указанные особенности полной модели являются несущественными. Однако, для синтеза, например, систем управления воздушораспределением, очевидно, упрощенная модель не может быть использована, т.к. характер и длительность переходных процессов в этих системах играет решающую роль при расчете параметров системы.

Для оценки характера переходных процессов в общей и упрощенной модели лавы динамические свойства воздушного потока были исследованы также с учетом потерь на трение (рис.5).

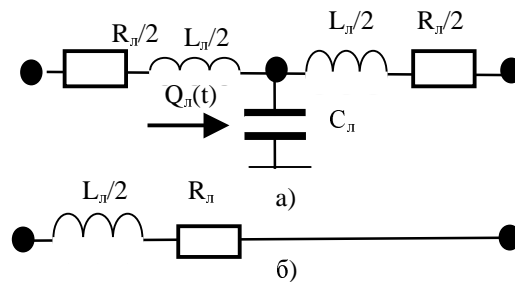


Рисунок 5 – Схемы замещения воздушного потока лавы с учетом потерь на трение (а – общая модель динамики, б – приближенная модель динамики воздушного потока)

С этой целью схемы замещения были дополнены аэродинамическими сопротивлениями, в которых использовался квадратичный закон сопротивления [1,7,9]:

$$\Delta H_{\text{тр}} = R Q_{\text{л}} |Q_{\text{л}}|, \quad (13)$$

где $|Q_{\text{л}}|$ – модуль расхода воздуха в лаве; R – квадратичное сопротивление, $\text{нс}^2/\text{м}^8$; $\Delta H_{\text{тр}}$ – потери напора в лаве, $\text{н}/\text{м}^2$.

В экспериментах квадратичное сопротивление лавы принималось равным $R_{\text{л}} = 3 \text{ нс}^2/\text{м}^8$. Результаты машинных экспериментов по исследованию переходных процессов в лаве с учетом потерь на трение приведены на рис.6.

Анализ полученных графиков переходных процессов с учетом потерь на трение показывает, что учет аэродинамического сопротивления практически не оказывает влияния на длительность и общий характер переходного процесса. Однако длительность основной части переходного процесса в моделях с учетом потерь на трение значительно изменяется.

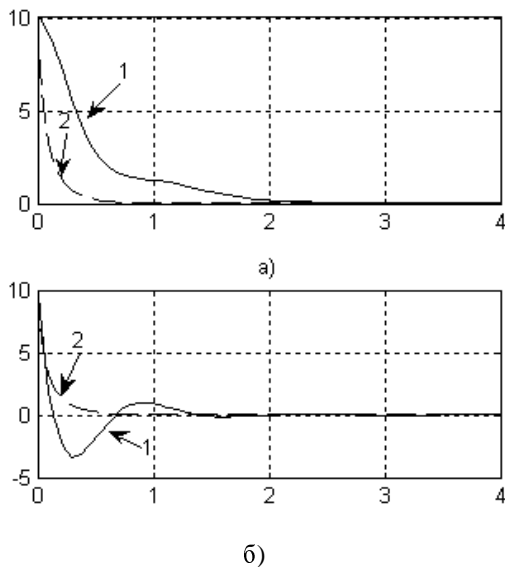


Рисунок 6 – Аэродинамические процессы в лаве при выключении напора (Н) с учетом потерь на трение в общей (1) и приближенной (2) модели (а – в рабочем диапазоне шахтной вентиляционной сети, б – в неограниченном диапазоне частот).

В целом, анализ полученных результатов показывает, что в модели воздушного потока лавы с учетом и без учета сжимаемости воздушного потока процессы носят практически идентичный характер. Однако, в приближенной модели без учета сжимаемости переходные процессы по воздуху затухают значительно более быстро. Следовательно, в этом случае приближенная модель может быть рекомендована только для тех приложений, в которых важен только характер переходного процесса, а длительность процессов динамики играет второстепенную роль. В противном случае в качестве адекватной модели следует использовать модель с учетом как инерционности, так и сжимаемости воздушного потока в лаве.

Заключение

В работе проведено исследование переходных процессов в коротких в аэродинамическом отношении воздуховодах (лаве) шахтной вентиляционной сети. Показано, что полная модель динамики воздушного потока коротких воздуховодов (лавы) при определенных условиях может быть сведена к модели минимальной сложности – к уравнению первого порядка, параметры которого целиком и полностью определяются аэродинамическими характеристиками короткого воздуховода шахтной сети.

В дальнейшем полученные результаты планируется использовать при синтезе систем автоматического регулирования воздухораспределения в шахтной сети.

Литература

1. Справочник по рудничной вентиляции / Под ред. К.З. Ушакова. – М.:Недра, 1977. – 328с.
2. Частотные свойства шахтной вентиляционной сети как объекта автоматического регулирования / П.Н. Ермолаев и др. – В кн.: Автоматическое управление в горном деле. – Новосибирск: Б.И., 1971. – С. 16 – 23.
3. Абрамов Ф.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф.А. Абрамов, Л.П. Фельдман, В.А. Святный. – К.: Наукова думка, 1981. – 284с.
4. Петров Н.Н. Электронная модель системы автоматического управления проветриванием шахт / .Н.Н. Петров, П.Н. Ермолаев, П.Т. Пономарев. – В кн.: Автоматическое управление в горном деле. – Новосибирск: Б.И., 1971. – С. 89 – 93.
5. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832с.
6. Лапко В.В. Передаточные функции горной выработки как звена системы управления распределением воздуха / В.В. Лапко, С.С. Ефремов, А.Г. Кравченко // Разработка месторождений полезных ископаемых, рудничная вентиляция и техника безопасности. – К: Техника, 1992. - №36. – С. 3 – 8.
7. Лапко В.В. Синтез структуры и параметров аэродинамической модели длинных горных выработок вентиляционных систем угольных шахт / В.В. Лапко, О.Ю. Чередникова // Наукові праці ДонНТУ. Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка. – Донецьк, 2007. - №8. – С.193 – 200.
8. Lapko V.V. Ein Modellierungsansatz für aerodynamische Netze mit verteilten Parametern. / V.V. Lapko. – In: Hohmann G. (Hrsg.): Tagungsband 13. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Weimar 1999. – P. 325 – 330.
9. Lapko V.V. Modellgestützte Entwicklung und Untersuchung von adaptiven Steuerungssystemen für Netzobjekte / V.V. Lapko // In Alex Kuhn und Wenzel: Tagungsband 11. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Dortmund, 1997. – P. 739 – 744.