УДК 536:24:622:413

А.Ф.ГАЛКИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ШАХТ И РУДНИКОВ СЕВЕРА

Исследованы системы регулирования теплового режима шахт и рудников Севера, в которых энергетические источники имеют произвольное расположение по длине выработок. Определены оптимальные расстояния между источниками по критерию экономии энергии на кондиционирование рудничного воздуха. Установлены закономерности расположения энергетических источников при постоянном и переменном расходе воздуха в выработке.

Systems of regulation of a thermal conditions of air of mines of the north in which energy sources have an any arrangement on length of developments are investigated. Optimum distances between sources by criterion of economy of energy on air condition in mine are certain. Laws of an arrangement of energy sources are established at the constant and variable charge of air in development.

Обычно на шахтах и рудниках применяют центральную схему регулирования теплового режима, когда источник энергии, например, калориферная установка, размещен в начале цепи горных выработок [3-5]. Такое размещение главной калориферной установки при использовании теплоаккумулирующих выработок (ТАВ) экономически нецелесообразно. Менее энергоемкой является схема регулирования с размещением калориферной установки в конце сети ТАВ [1]. В данной работе мы рассмотрели более общий случай, когда калориферные установки размещены в произвольной последовательности по длине вентиляционного пути, определили их оптимальное количество и порядок размещения, которые необходимы для достижения цели – минимума энергетических и экономических затрат на регулирование теплового режима. Из результатов ранее проведенных исследований [1, 2] логически вытекает, что, размещая последовательно по длине несколько кондиционирующих установок (в общем случае ими могут быть и системы ТАВ), мы сможем добиться снижения общей энергоемкости системы регулирования теплового режима.

Размещение энергетических установок (ЭУ), рассредоточенных по длине, целесообразно при условии

$$N_0 - \sum_{i=1}^{n} N_i > 0, \qquad (1)$$

где N_0 – мощность ЭУ для кондиционирования при размещении ее в начале вентиляционного пути, кВт; N_i – мощность i-й ЭУ, рассредоточенной по длине установки, кВт; n – общее количество установок на всем вентиляционном пути.

Размещение энергетических установок, рассредоточенных по длине, экономически выгодно при условии

$$Э_0(\tau) - \sum_{i=1}^{n} Э_i(\tau) > 0, \qquad (2)$$

где $Э_0(\tau)$– приведенные затраты на регулирование теплового режима при размещении ЭУ в начале вентиляционного пути, руб./год; $Э_i(\tau)$ – то же при размещении ЭУ, рассредоточенных по длине, руб./год; τ – длительность работы системы, ч.

Условия (1) и (2) позволяют выбрать энергетически и экономически эффективный способ регулирования с помощью рассредоточенных ЭУ, в частности, их количество и способ размещения по длине вентиляционного пути. При этом необходимо ответить на два вопроса:

1) если использовать n ЭУ вместо одной центральной, то при каком n энергоемкость системы регулирования теплового режима минимальна;

2) при каком отношении l_n/L энергоемкость системы минимальна, если l_n – расстояние между ЭУ, а L –общая длина вентиляционного пути (для лавы – длина лавы, для шахты – длина вентиляционного пути со свежей струей воздуха и т.п.).

Для ответа на эти вопросы составим целевую функцию, используя соотношение (1)

$$f' = N_0 - \sum_{i=1}^{n} N_i, \qquad (3)$$

и исследуем ее на максимум. Очевидны следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^{n} N_i = Gc_p(t_1 - t_{\text{ïð}}) + Gc_p(t_2 - t_{\text{ïð}}) +$$

$$+ Gc_p(t_3 - t_{\text{ïð}}) + ... + Gc_p(t_i - t_{\text{ïð}}) + ...$$

$$... + Gc_p(t_{\text{n}} - t_{\text{ïð}}), \qquad (4)$$

$$N_0 = Gc_p(t_0 - t_{\text{í}}), \qquad (5)$$

где G – расход воздуха, кг/с; c_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); t_0 – температура подогрева воздуха (охлаждения) после центральной ЭУ, определяемая обратным тепловым расчетом, °С; $t_{\text{н}}$ – наружная температура воздуха, °С; $t_{\text{пр}}$ – температура воздуха в конце вентиляционного пути на рассматриваемом участке, °С; t_i – температура после рассредоточенной i-й ЭУ, °С.

Подставляя (4) и (5) в (3), после преобразования получим следующую целевую функцию:

$$f = t_0 + nt_{\text{ïð}} - \sum_{i=1}^{n} t_i. \qquad (6)$$

Для наглядности и простоты выкладок используем следующую зависимость для определения температуры:

$$t_i = (t_{\text{ïð}} - T_{\text{å}}) \exp A(l_i - l_{i-1}) + \dot{O}_{\text{å}}. \qquad (7)$$

Тогда целевая функция примет вид

$$f = t_0 + (t_{\text{ïð}} - T_{\text{å}}) \left[n - \sum_{i=1}^{n} \exp A(l_i - l_{i-1}) \right]. \qquad (8)$$

Исследование данной функции на максимум приводит к следующей системе уравнений:

$$\frac{df}{dl_i} = -A \exp A(l_i - l_{i-1}) + A \exp A(l_{i+1} - l_i) = 0,$$

$$i = 1, 2, 3, ..., n. \qquad (9)$$

Отсюда получим

$$2l_i = l_{i+1} - l_{i-1}. \qquad (10)$$

Тогда при $h_i = l_i - l_{i-1}$

$$h_i = h_{i+1}, \qquad (11)$$

что эквивалентно выражению

$$l_i = il_n/n, \qquad (12)$$

где l_n – общая длина, на которой размещаются ЭУ, м.

Выражения (11) и (12) показывают, что оптимальным по энергетическому фактору будет размещение установок, расположенных равномерно по длине. В этом случае функция $f \to \max$. Выполненные численные расчеты показывают, что место расположения установок существенно влияет на суммарные энергетические затраты и позволяет снизить их на 15-35 %.

Определим, какое количество источников целесообразно размещать в выработке по длине. Для определения используем целевую функцию вида

$$f = t_0 + \left(t_{\text{ïð}} - \dot{O}_{\text{å}}\right)n\left(1 - \exp AL/n\right). \quad (13)$$

Исследуя данную функцию на максимум, получим выражение

$$\text{å}^{\frac{AL}{n}}\left(1 - \frac{AL}{n}\right) = 1, \quad (14)$$

которое справедливо при $n \to \infty$, т.к.

$$\lim_{n\to\infty} \text{e}^{\frac{AL}{n}}\left(1 - \frac{AL}{n}\right) = 1. \quad (15)$$

Таким образом, наиболее энергетически эффективным способом регулирования теплового режима является способ, использующий равномерно рассредоточенные по длине выработки источники малой мощности, так как выражение (15) означает, что, чем больше равномерно рассредоточенных источников, тем больше экономия энергии.

При переменном расходе воздуха в выработке, что характерно для очистных выработок угольных шахт и подготовительных выработок всех шахт, рудников и подземных сооружений криолитозоны, полученные формулы требуют уточнения, поскольку целевая функция главным образом определяется значением t_i. С математической точки зрения это эквивалентно следующей формуле для нахождения неизвестной температуры ЭУ:

$$t_i = T_{\text{å}} + \left(t_{\text{ïð}} - T_{\text{å}}\right)\exp\left[\int_{l_{i-1}}^{l_i} A(l)dl\right]. \quad (16)$$

Рассмотрим вариант, характерный для очистных выработок:

$$A(l) = A/(G_0 + Cl)^m. \quad (17)$$

После вычисления интеграла в (16) и преобразований получим

$$t_i = T_{\text{å}} + \left(t_{\text{ïð}} - T_{\text{e}}\right)\exp\left[a\left(\frac{1}{y_{i-1}^k} - \frac{1}{y_i^k}\right)\right], \quad (18)$$

$$a = A/C(m-1);\ y_i^k = \left(G_0 + Cl_i\right)^{m-1}. \quad (19)$$

Параметры C и A определяются из выражений

$$C = \left(G_0 - G_k\right)/L;\ A = K_\tau U/c_{\text{ð}}. \quad (20)$$

Подставляя (1) в выражение (6) и исследуя полученную функцию на максимум, получим следующую систему уравнений:

$$\frac{df}{dy_i} = \exp\left[a\left(\frac{1}{y_{i-1}^k} - \frac{1}{y_i^k}\right)\right] - \exp\left[a\left(\frac{1}{y_{i-1}^k} - \frac{1}{y_{i+1}^k}\right)\right] = 0,$$

$$i = 1, 2, 3, ..., n. \quad (21)$$

Откуда при $k = m - 1$ и $x = 1 - m$ имеем

$$y_i = \left(\frac{i}{n}\right)^{\frac{1}{x}} y_n. \quad (22)$$

Сравнивая (22) с (12), видим существенную разницу между двумя выражениями. Параметр h_i определяется по формуле

$$h_i = \left(\sqrt[x]{i/n} - \sqrt[x]{(i-1)/n}\right)y_n. \quad (23)$$

Используя соотношения для определения параметров C и y_i, получим соотношения для определения расстояния установки i-го калорифера:

$$\left(l_i/L\right) = \left[1 - \eta\left(i/n\right)^{\frac{1}{1-m}}\right] \Big/ \left(1 - \eta\right), \quad (24)$$

где $\eta = G_k/G_0$ – коэффициент доставки воздуха.

Рассмотрим случай $m = 1$. Проинтегрировав (17),

$$t_i = T_{\text{å}} + (t_{\text{ïð}} - T_{\text{å}})(y_i/y_{i-1})^{\text{Ð}}, \quad (25)$$

где $P = A/C$.

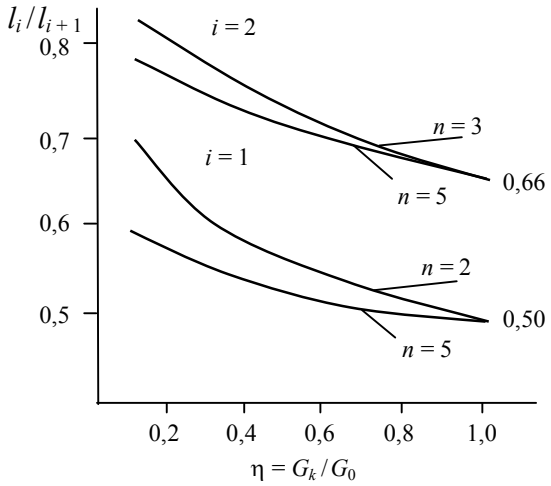
Подставив (25) в (6) и исследовав полученную функцию на максимум, имеем

$$y_i = \sqrt{y_{i+1}y_{i-1}},\ \ i = 1, 2, 3, ..., n. \quad (26)$$

Откуда

$$\frac{l_i}{L} = \frac{1 - \eta^{i/(n+1)}}{1 - \eta}. \quad (27)$$

Для примера рассмотрим случай $n = 2$ и $\eta = 1$, что эквивалентно постоянному расходу воздуха в выработке. Раскрывая полученную неопределенность $(0/0)$, получим численный результат:



Изменение соотношений длин в зависимости от коэффициента доставки воздуха для различного количества калориферов, используемых в выработках

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{1/3}{2/3} = 0{,}5.$$

Таким образом, при постоянном расходе воздуха в выработке ЭУ должны быть расположены равномерно по длине, что и было доказано ранее. Для наглядности приведем графики изменения отношения l_i / l_{i+1} в зависимости от коэффициента доставки воздуха и различного числа ЭУ в выработке (см. рисунок).

Из графиков видно, что с уменьшением коэффициента доставки отношение l_i / l_{i+1} увеличивается, т.е. размещать ЭУ по длине выработки для достижения максимального энергетического эффекта надо неравномерно, определяя расстояние для расположения *i*-го ЭУ по формуле (24).

Сравнительный анализ позволяет также сделать вывод о существенном влиянии принятой расчетной модели на конечный результат – определение закона размещения ЭУ по длине и необходимости использования более точных моделей, учитывающих, в частности, изменение расхода воздуха по длине выработки. В связи с этим нами была разработана наиболее общая модель для прогноза температуры воздуха в выработке, а также приведена математическая модель, алгоритм и программа для прогноза температурного режима в горных выработках при наличии рассредоточенных энергетических источников, мощность и координаты которых изменяются во времени [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим подземных сооружений Севера. Новосибирск: Наука, 2000. 305 с.

2. *Галкин А.Ф.* Проектирование горнотехнических систем регулирования теплового режима шахт и рудников Севера // Проблемы и перспективы развития горного дела на Северо-Востоке СССР. Якутск, 1990. Ч.1. С.122-128.

3. *Дядькин Ю.Д.* Основы горной теплофизики. М.: Недра, 1968. 256 с.

4. *Кравченко В.Т.* Тепловой режим глубоких рудников / В.Т.Кравченко, В.Ю.Шувалов. М.: Недра, 1993. 158 с.

5. *Шувалов Ю.В.* Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 196 с.