УДК 536:24:622:413

Ю.В.ШУВАЛОВ, А.Ф.ГАЛКИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Изложены основные принципы расчета горно-технических систем кондиционирования воздуха. Описан новый подход к моделированию теплового режима в горных выработках, позволяющий оптимизировать параметры систем по заданным критериям качества. Горно-технические системы рассматриваются как системы с распределенными параметрами, характеристики которых изменяются по координатам и во времени.

Main principles of calculation of mines technical systems of regulation of thermal conditions of air are stated. It is used the new approach to modeling of thermal conditions in working. Mines technical systems are presented as systems with properties changing on coordinates and in time.

Горно-технические системы регулирования теплового режима шахт, рудников и подземных сооружений криолитозоны представляют собой системы горных выработок, отработанных или специально пройденных, служащих для подогрева и охлаждения воздуха в течение годового цикла проветривания [8, 9, 11, 13]. Общим недостатком таких систем, которые мы определили по классификации как обыкновенные горно-технические системы [3], является невысокая эффективность при больших расходах воздуха, а также необходимость исключать их (для повышения энергетической эффективности) из общей схемы проветривания объекта в переходные периоды года [8]. Исследователи отмечают, что при небольших расходах воздуха и наличии сети горных выработок большой длины обыкновенные горно-технические системы могут быть рентабельны и приносить существенную чистую прибыль за счет перехода на безкалориферный способ подогрева шахтного воздуха [10, 13, 14].

Опыт эксплуатации шахт и рудников Севера показывает, что обыкновенные горно-технические системы эффективны при наличии большого числа отработанных горных выработок, пройденных в устойчивых породах, когда капитальные затраты на реконструкцию и эксплуатационные затраты на поддержание системы выработок минимальны. Следует также учитывать, что затраты на вентиляцию выработок существенно возрастают с их длиной и расходом воздуха. При этом казалось бы очевидный вариант снижения затрат путем параллельного соединения выработок в единую сеть с соответствующим снижением расхода воздуха в каждой ветви не всегда эффективен. Как показывают расчеты [2, 4], в этом случае снижается и общая тепловая эффективность системы – эффективность накопления энергии горными породами, которая напрямую зависит от скорости движения воздуха в выработках.

Особый интерес представляют обыкновенные горно-технические системы периодического действия и служащие либо только для подогрева, либо только для охлаждения воздуха, подаваемого на объект. В этом случае режим накопления энергии не зависит от эксплуатационного режима и является управляемым фактором. Например, если

целью является снижение затрат на подогрев воздуха в зимний период, то в теплый период года (период накопления энергии) система выработок может проветриваться с большим количеством воздуха, в том числе по рециркуляционной схеме, независимо от потребности объекта регулирования. Оптимальная величина расхода воздуха выбирается из условия достижения заданного критерия качества в эксплуатационный период, например, температуры воздуха в конце зимнего периода на выходе из горно-технической системы. Для условий резко-континентального климата, характеризующегося большими суточными и декадными колебаниями температуры атмосферного воздуха, таким критерием может быть минимум суммы амплитуд колебаний температуры на выходе из системы перед подачей воздуха в калориферную установку.

Если горно-техническая система универсальна, т.е. служит и для подогрева и для охлаждения вентиляционной струи, а расход воздуха в ней постоянен, определяющим фактором является суммарный максимальный энергетический или экономический эффект. Следует учитывать, что при больших расходах воздуха, особенно для отдаленных рудников Севера, затраты энергии на кондиционирование воздуха значительны и существующих районных энергетических мощностей (электрических или тепловых) может просто не хватить. Поэтому вначале следует проводить энергетическую оценку целесообразности использования горно-технических систем регулирования теплового режима, а уже затем оптимизировать параметры системы на основе экономической целевой функции.

В общем случае теоретические расчеты обыкновенной горно-технической системы для целей проектирования системы кондиционирования рудничного воздуха включают [4, 5]:

- обоснование выбора схемы соединения горных выработок в единую сеть и изменение топографии сети с течением времени, по мере развития горных работ и изменения теплофизических характеристик деятельного слоя пород, окружающих выработки;
- определение экономически оптимальной общей длины теплообменных выработок и рационального места расположения энергетической установки (калорифера или холодильного агрегата);
- оценка целесообразности строительства специальных теплообменных выработок и эффективности использования в качестве теплообменных выработок отработанных горизонтов;
- выбор оптимальных сечений выработок горно-технических систем и количества подаваемого в них воздуха для достижения заданного критерия качества;
- выбор оптимального способа крепления выработок и способов повышения энергетической эффективности системы.

Целевая функция затрат, подлежащая минимизации, складывается из следующих составляющих:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где Z_1 – затраты на вентиляцию выработок горно-технической системы, руб./год; Z_2 – затраты на строительство (реконструкцию) выработок системы, руб./год; Z_3 – затраты на дополнительное кондиционирование воздуха в энергетической установке, руб./год.

Экономическая эффективность системы Э определяется как разность затрат и экономического эффекта, получаемого от снижения расхода энергии на кондиционирование воздуха с помощью только энергетической установки.

Для автоматизированного проектирования обыкновенных горно-технических систем разработана общая программа выбора оптимальных параметров на ЭВМ, которая позволяет для конкретных условий выбрать оптимальные с экономической точки зрения длину, скорость воздуха в выработках, количество параллельных выработок и их эквивалентный радиус. Программа построена по модульному принципу и позволяет использовать как известные аналитические зависимости для прогноза температуры в выработках [8, 13], так и специальные модели, предполагающие численную реализацию на ЭВМ [3, 6]. Математическая поста-

новка задачи сформулирована следующим образом.

Минимизируем целевую функцию вида

$$Э' = -Э(l, n, R) \qquad (2)$$

при ограничениях

$$\widetilde{a}_1 \le l \le \widetilde{b}_1, \widetilde{a}_2 \le n \le \widetilde{b}_2, \widetilde{a}_3 \le R \le \widetilde{b}_3, \qquad (3)$$

$$h(l, n, R) \le h_{\text{пр}}, \qquad (4)$$

где $Э(l, n, R)$ – целевая функция экономической эффективности применения горнотехнической системы регулирования теплового режима, руб./год; l – длина выработки, м; n – количество параллельных выработок, м; R – эквивалентный радиус выработки, м; $h(l, n, R)$ – депрессия ТАВ, кг/м^2; $h_{\text{пр}}$ – предельно допустимая депрессия, кг/м^2; $\widetilde{a}_i$, $\widetilde{b}_i$ – константы, определяемые техническими и технологическими особенностями объекта, $i = \overline{1, 3}$.

Данная оптимизационная задача классифицируется как минимизация гладкой нелинейной функции (2) при простых ограничениях на переменные (3) и гладкой нелинейной функции ограничения (4).

Для решения преобразуем исходную задачу с ограничениями в задачу безусловной оптимизации методом штрафной функции [1].

Минимизируем функцию вида

$$Э' + \left[\max\left\{0, \Delta h\,(l, n, R)\right\}\right]^2 \qquad (5)$$

при условии

$$\widetilde{a}_1 \le l \le \widetilde{b}_1, \widetilde{a}_2 \le n \le \widetilde{b}_2, \widetilde{a}_3 \le R \le \widetilde{b}_3, \qquad (6)$$

где $\Delta h = h(l, p, R) - h_{\text{пр}}$.

Так как простые ограничения (6) уменьшают область поиска оптимума, будем рассматривать задачу (5) отдельно от (6). Получим вспомогательную задачу безусловной оптимизации. Для выбора метода решения необходимо решить вопрос об использовании производных целевой функции (5). Необходимо отметить, что производные целевой функции являются сложными выражениями, которые в явном аналитическом виде не могут быть выражены и требуют специального численного метода поиска. Кроме того, задача еще более усложняется использованием в целевой функции (5) для определения необходимых параметров поиска численного решения системы дифференциальных уравнений при определении температуры воздуха в выработке. Поэтому имеет смысл выбрать метод оптимизации, который не требует вычисления производных целевой функции. Анализ методов многомерного поиска минимума функции без использования производных показал, что наиболее приемлемым в нашем случае является метод Хука и Дживса [1]. Данный метод осуществляет два вида поиска – исследующий и по образцу. Преимуществом данного метода перед другими методами этого класса являются: небольшое число вычислений функции; поиск по образцу (улучшает сходимость); большая точность вычисления оптимальных точек.

Метод использует одномерную минимизацию вдоль координатных направлений и направлений поиска по образцу. Для осуществления одномерной минимизации выбран алгоритм Брента [12], в котором используется комбинация поиска золотого сечения и последовательной параболической интерполяции. Как утверждает автор алгоритма, сходимость метода не хуже, чем для широко используемого поиска Фибоначчи. Функция в данном методе никогда не вычисляется в двух точках, отстоящих друг от друга менее чем на EPS*ABS(X) + TOL/3, где EPS приблизительно равно корню квадратному из относительной машинной точности, а TOL – желаемая длина интервала неопределенности конечного результата. Метод аппроксимирует абсциссу минимума функции на интервале с ошибкой меньше 3*EPS*ABS(X)+TOL. Поскольку оптимизационные методы дают решение лишь в пределе, необходимо предусматривать специальные правила прерывания счета – критерий останова.

При решении задач безусловной минимизации гладких функций существуют две формы запроса точности: первая – указывается желаемая близость к оптимуму по точке, вторая – по значению целевой функции.

В нашем случае критерием останова оптимизации взяты неравенства [7]:

$$F_{k-1} - F_k < \tau_F \left(1 + |F_k|\right), \qquad (7)$$

$$\|x_{k-1} - x_k\| < \sqrt{\tau_F}\left(1 + \|x_k\|\right), \qquad (8)$$

где τ_F – желаемая точность вычисления минимизируемой целевой функции F.

Неравенства (7) и (8) являются признаками близости последовательностей $\{F_k\}$ и $\{x_k\}$ к своим пределам. В нашем случае F_k является вспомогательной функцией (5), вычисленной в точке $x_k(l, n, R)$ на k-й итерации. В качестве нормы $\|\cdot\|$ принята евклидова норма, которая вычисляется по формуле

$$\|x_k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ki}^2}\ . \qquad (9)$$

Для решения сформулированной задачи были разработаны совместно с В.М.Ивановым специальный алгоритм и программа (см. рисунок).

Укрупненная блок-схема имеет вид:

Блок 1. Основной модуль, который осуществляет ввод исходной информации, подготовку данных для расчетов и вывод полученной численной информации.

Блок 2. Реализован алгоритм Хука и Дживса с одномерной минимизацией по алгоритму Брента. На каждой итерации осуществляется переход к блокам 3 и 4, а также вывод промежуточной информации.

Блок 3. Вычисление значения функции при одномерной минимизации по алгоритму Брента. Возможно обращение к блоку 5, если используется численный метод расчета температурного режима в горной выработке.

Блок 4. Вычисление целевой функции, вывод значения функции, значения точки, параметров теплообмена и вентиляции. Возможно обращение к блоку 5.

Блок 5. Численный расчет температурного режима теплообменной выработки.

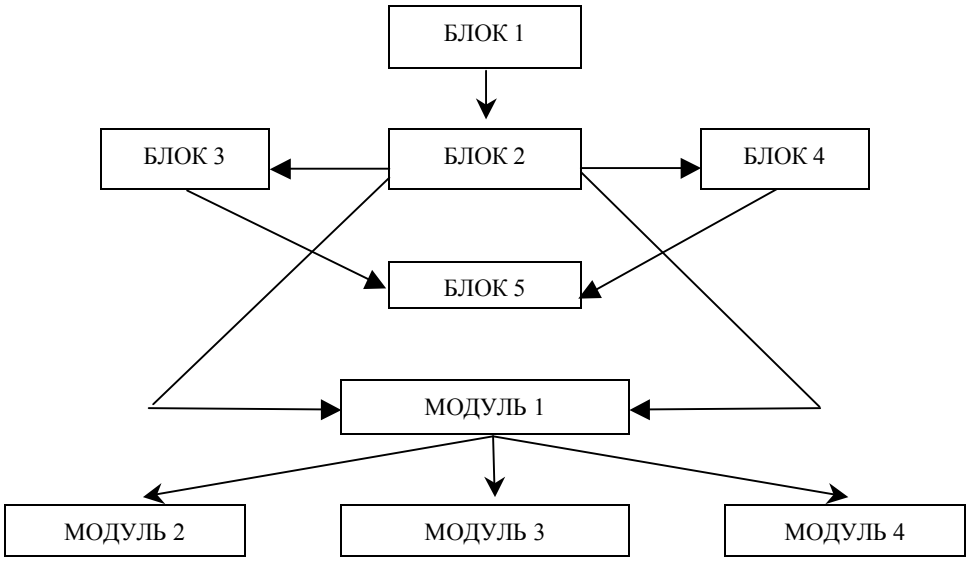
Модуль 1. Реализован алгоритм Хука и Дживса. Последовательное обращение к модулям 2, 3, 4. Вывод на экран промежуточных данных.

Модуль 2. Определение интервала согласно простым ограничениям на переменные для одномерной минимизации.

Модуль 3. Реализован алгоритм Брента одномерной минимизации.

Модуль 4. Вычисление евклидовой нормы. Вывод на экран значения нормы.

Реализована оптимизационная задача в следующей постановке: минимизируем целевую функцию



Блок-схема программы выбора оптимальных параметров обыкновенных горно-технических систем регулирования теплового режима

$$Э' = -Э(l,\ V,\ R) \qquad (10)$$

при ограничениях

$$\widetilde{a}_1 \le l \le \widetilde{b}_1,\ \widetilde{a}_4 \le V \le \widetilde{b}_4,\ \widetilde{a}_3 \le R \le \widetilde{b}_3.$$

В отличие от приведенной выше, настоящая программа позволяет найти оптимальное количество воздуха (скорость воздуха), которое целесообразно подавать в теплообменную выработку, а также эквивалентный радиус выработки и ее длину. При этом количество выработок считается заданной величиной, что характерно для подземных сооружений, имеющих отработанные горные выработки, пригодные к вторичному использованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Базара М.* Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы / М.Базара, К.Шетти. М.: Мир, 1982. 583 с.

2. *Галкин А.Ф.* Горно-технические системы регулирования теплового режима шахт и рудников // 24-я Международная конференция НИИ по безопасности работ в горной промышленности: Доклады. Ч.II. Донецк, 1991. С.315-322.

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

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

5. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим горных выработок при реверсии вентиляционной струи // Доклады 10-й сессии Международного бюро по горной теплофизике. Гливице, 2005. С.321-329.

6. *Галкин А.Ф.* Теплоаккумулирующие выработки / А.Ф.Галкин, Ю.А.Хохолов. Новосибирск: Наука, 1992. 133 с.

7. *Гилл Ф.* Практическая оптимизация / Ф.Гилл, У.Мюррей, М.Райт. М.: Наука, 1977. 736 с.

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

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

10. Ресурсосберегающие аппараты и системы / В.Д.Мерчанский, В.А.Рогалев, Ю.В.Шувалов, В.Н.Денисов / МАНЭБ. СПб, 1999. 371 с.

11. Способы вскрытия, подготовки и системы разработки шахтных полей / Под ред. Б.Ф.Братченко. М.: Недра, 1985. 494 с.

12. *Форсайт Дж.* Машинные методы математических вычислений / Дж.Форсайт, М.Малькольм, К.Модлер. М.: Мир, 1980. 280 с.

13. *Шувалов Ю.В.* Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера / ЛГУ. Л., 1988. 196 с.

14. Geothermal preheating of mine intake air. Min Wang Ying, Yi Chu. «Trans Inst. Mining and Met.» Oct. 1985. P.189-194.