

тивность внедрения которых подтверждается практикой ведения работ на угольных месторождениях.

1. *Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа* / В. Н. Потураев, А. Н. Зорин, В. Е. Забигаило и др. — Киев : Наук. думка, 1986. — 160 с.
2. *Лукинов В. В.* О связи верхней границы зоны метановых газов и первого появления выбросов // *Выбросы угля, породы и газа*. — Киев : Наук. думка, 1976. — С. 73—74.
3. *Геологические условия выбросоопасности угольных пластов Донбасса* / Под ред. В. Е. Забигаило. — Киев : Наук. думка, 1980. — 189 с.
4. *Забигаило В. Е., Лукинов В. В., Зражевская Н. Г.* О минимальной глубине выбросов угля и газа на шахтах // *Уголь Украины*. — 1985. — № 5. — С. 41.
5. *Скочинский А. А.* Современные представления о природе внезапных выбросов угля и газа в шахтах и меры борьбы с ними // *Уголь*. — 1954. — № 7. — С. 4—10.
6. *Шатилов В. А.* Внезапный выброс породы // *Уголь Украины*. — 1987. — № 7. — С. 29—30.
7. *Бобров И. В.* Выбросы породы при проведении горных выработок в Донецком бассейне // *Вопросы безопасности в угольных шахтах*. — М. : Недра, 1965. — Вып. 17. — С. 143—164.
8. *Выбросоопасность горных пород Донбасса* / В. Е. Забигаило, В. В. Лукинов, А. З. Широков. — Киев : Наук. думка, 1983. — С. 279.
9. *Лукинов В. В.* Литогенез песчаников Донбасса и локальный прогноз их выбросоопасности на шахтах : Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — Новочеркасск, 1990. — 36 с.

Ин-т геотехн. механики АН Украины,
Днепропетровск

Получено 22.01.92

УДК 622.413.4:621.57

Ю. А. Цейтлин

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ В ГЛУБОКИХ ШАХТАХ ДОНБАССА

Рассмотрены основные задачи, решение которых необходимо для обеспечения нормализации тепловых условий в глубоких шахтах. Показано, что прогноз тепловых условий в горных выработках — задача с неопределенными исходными данными, которую можно решить лишь в вероятностной, а не детерминированной постановке. Изложены требования к методам проектирования систем кондиционирования воздуха в шахтах и управления этими системами, обеспечивающие необходимую надежность нормализации тепловых условий в горных выработках.

Нормализация тепловых условий в горных выработках глубоких шахт Донбасса является одной из важнейших проблем, без решения которой невозможно дальнейшее развитие этого бассейна. Непрерывное углубление горных работ приводит к тому, что все больше шахт Донбасса нуждаются в искусственном охлаждении воздуха. Характерны в этом отношении следующие данные: в 1965 г. температура вентиляционного воздуха превышала допустимую величину на 35 шахтах Донбасса, причем в неблагоприятных тепловых условиях работало 9 тыс. шахтеров; в 1975 г. эти цифры были соответственно равны 65 шахтам и 21 тыс.; в 1985 г. — 80 и 33 тыс. и, наконец, в текущем году — 88 шахтам и 62 тыс. шахтеров.

Несмотря на то что на 49 шахтах бассейна применяется искусственное охлаждение воздуха, в том числе с помощью 34 мощных стационарных и полустационарных холодильных установок, проблема не становится менее острой, тем более что во многих случаях наличие системы кондиционирования воздуха в шахте (СКВШ) еще не является гарантией нормализации тепловых условий на рабочих местах.

Проблема нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт включает четыре основные задачи: разработка научно обоснованных нормативных значений параметров воздуха, обеспечивающих в условиях

© Ю. А. Цейтлин, 1993

горных выработок выполнение шахтерами необходимой работы без перенапряжения системы терморегуляции и вредных последствий для организма; прогноз тепловых условий в выработках при проектировании новых и развитии действующих шахт; проектирование горно-технических мероприятий и, если необходимо, систем искусственного охлаждения (кондиционирования) воздуха, обеспечивающих нормализацию тепловых условий в выработках; управление вентиляционными режимами и элементами СКВШ с целью поддержания необходимого микроклимата в выработках в условиях меняющихся параметров как СКВШ, так и окружающей среды.

К сожалению, ни одна из этих задач в настоящее время не решена в полном объеме.

До последнего времени максимально допустимая температура воздуха в горных выработках, регламентируемая Правилами безопасности и Санитарными нормами, составляла, в зависимости от скорости и влажности воздуха, 22—26 °С. Эти значения существенно ниже нормативных величин, принятых во всех странах с развитой горно-добывающей промышленностью. Однако их обоснованность вызывает большие сомнения¹. В связи с этим существует насущная необходимость проведения обширных медико-биологических исследований по разработке критериев допустимого (без ущерба для здоровья) состояния шахтеров, выполняющих работу в условиях стесненного пространства горных выработок при высоких температурах и влажности воздуха. Кроме того, необходимы исследования фактической охлаждающей способности вентиляционного воздуха в выработках. Только используя результаты таких исследований можно получить научно обоснованные нормативные значения тепловых параметров вентиляционного воздуха в горных выработках в зависимости от тяжести работы, выполняемой человеком, а также разработать меры, предупреждающие возникновение необратимых последствий при необходимости работы в условиях, когда тепловые параметры воздуха выше допустимых.

Решению задачи прогноза тепловых условий в горных выработках глубоких шахт посвящено наибольшее число исследований как в странах СНГ, так и за рубежом. Разработанные методы такого прогноза позволяют с приемлемой точностью рассчитать температуру и влажность вентиляционного воздуха в сети горных выработок при условии, что точно известны: значение физических свойств пород, окружающих выработки; геометрические размеры выработок; размещение, тип и мощность оборудования, находящегося в шахте; расходы воздуха и время проветривания выработок; условия массообмена между окружающим выработки массивом и воздухом. В то же время реально большинство из этих факторов не может быть определено с достаточной точностью при прогнозном расчете. Кроме того, даже если известны проектные геометрические размеры будущей выработки, особенно участковой, со временем они могут существенно измениться. Например, при обследовании Днепрогипрошахтом состояния выработок на глубоких шахтах Центрального района Донбасса достаточно типичными были данные замеров сечения полевого откаточного штрека длиной 1660 м. При среднем значении площади сечения 9,2 м² фактически она изменялась от 5,2 до 14,2 м². Еще сложнее обстоит дело с прогнозом расхода воздуха в выработках в различные периоды существования шахты. Во время упомянутого выше обследования шахт было определено, что фактические расходы вентиляционного воздуха в очистных и подготовительных забоях шахт по отношению к значениям этих расходов, принятых при прогнозном тепловом расчете, составляли 23—156 %, а отличие фактических температур воздуха в этих забоях от расчетных составляло от $\pm$ (2—4) до 6 °С.

Таким образом, прогнозный тепловой расчет вентиляции шахты, в случае, когда он производится для несуществующей системы выработок, представляет собой типичную задачу с неопределенными исходными данными. Поэтому используемые в настоящее время при таких расчетах методы определения детерминированных значений температур и влажности воздуха,

¹ В настоящее время эти нормы пересматриваются.

несмотря на стремление учесть все возможные источники тепла и влаги в горных выработках, создают лишь иллюзию точности получаемых результатов.

Реально, при фактически существующей неопределенности большого числа исходных данных, при прогнозе тепловых условий можно говорить лишь о расчете, с некоторой вероятностью, диапазона, в котором будут находиться параметры вентиляционной струи в различных сечениях выработок в определенный момент времени.

Первые попытки такого подхода к определению тепловых параметров вентиляционного воздуха были сделаны в ИГТМ АН Украины [2, 3], однако необходима разработка концепции и инженерного метода определения тепловых параметров воздуха в горных выработках с учетом неопределенности исходных данных.

В настоящее время проектные институты, обслуживающие Донбасс, при проектировании СКВШ со стационарными холодильными установками используют методику, разработанную Днепрогипрошахтом и ИГТМ АН Украины [4].

Эта методика позволяет выбрать оборудование системы и определить режимы работы ее элементов, обеспечивающие минимальные приведенные затраты на нормализацию тепловых условий в шахте за весь проектный период ее существования. Однако, хотя методика учитывает развитие СКВШ во времени и пространстве, она основана на использовании результатов детерминированных методов теплового расчета вентиляции на разных этапах развития горных работ, недостатки которых были отмечены выше. В то же время оборудование и его режимы работы, оптимальные в условиях, принятых при проектировании, могут быть очень далекими от оптимальных при изменении условий их работы.

Проведенные ИГТМ АН Украины обследования эксплуатируемых СКВШ некоторых шахт Донбасса [5] показали, что одна из главных причин низкой эффективности этих систем — несоответствие их проектных и фактических параметров и режимов работы. Повышение надежности принимаемых проектных решений возможно при выборе оборудования СКВШ на основании прогнозного теплового расчета вентиляции шахт, учитывающего реальную неопределенность исходных данных [3].

Однако независимо от метода выбора проектных параметров элементов СКВШ, наличие существенной априорной неопределенности условий их работы делает невозможной эффективную эксплуатацию системы, не обладающей высокой степенью адаптивности без существенной потери ее экономичности.

Адаптивность СКВШ определяется ее способностью за счет изменения структуры или параметров отдельных ее элементов обеспечивать необходимые значения выходных параметров при изменяющихся условиях работы системы. Выходными параметрами СКВШ являются температуры вентиляционной струи за пунктами охлаждения воздуха (воздухоохладителями).

В случае оборудования пунктов охлаждения воздуха (ПОВ) стандартными воздухоохладителями МакНИИ, температура охлажденного воздуха равна [7]

$$t_{в.х} = t_{в.н} - \frac{a_1 k_n}{2b_1} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4b_1}{a_1^2} \left[c_1 + \frac{Q_n}{k_n c_p G_b} a_2 (b_2 - B) a_3 (\varphi_n - b_3) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left\{ k_w - (k_w - 1) \frac{W_n}{W} \right\} (0,1 t_{в.н} - 0,065 t_w - 0,95) a_4 (k_n G_b / G_{в.н})^n \right] \right], \quad (1)$$

где $t_{в.н}$, φ_n — температура и относительная влажность воздуха перед ПОВ; B — барометрическое давление в выработке; a_1 , b_1 и c_1 — эмпирические коэффициенты зависящие от параметров охлаждаемого воздуха [6]; k_n — коэффициент подмешивания холодного воздуха, равный отношению расходов через воздухоохладитель (ВО) и в выработке; Q_n — нормализованная холодильная мощность ВО; G_b — массовый расход воздуха в выработке; c_p — изобарная массовая теплоемкость воздуха; a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 , n и k_w — эм-

пирические коэффициенты, зависящие от типа ВО и определяющие поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно отличие фактических: барометрического давления, относительной влажности воздуха, расхода воздуха и расхода охлаждающей воды через ВО от нормализованных значений этих величин [4]; $G_{в,н}$ и $W_{н}$ — нормализованные значения расходов воздуха и воды через ВО; t_w — температура охлаждающей воды перед ВО; W — фактический расход охлаждающей воды через ВО.

Анализ этого выражения показывает, что управляемыми параметрами, определяющими адаптивность СКВШ, являются температура охлаждающей воды перед ВО, а также расходы воды и воздуха через аппарат. Область адаптации будет ограничиваться нормализованной холодильной мощностью ВО, допустимыми значениями температуры охлаждающей воды, скорости воды в трубопроводной сети, а также характеристиками вентилятора ВО и вентиляционного трубопровода, присоединенного к аппарату. Адаптивность СКВШ будет тем выше, чем больше возможные пределы изменения температур и расходов охлаждающей воды через ВО, а также расходов воздуха через эти аппараты. При этом стремление повысить адаптивность СКВШ при проектировании вступает в противоречие со стремлением обеспечить минимум приведенных затрат на кондиционирование воздуха в принятых проектных условиях [7].

В связи с этим рационально вместо используемой в настоящее время методики автоматизированного оптимального проектирования СКВШ, о которой упоминалось выше, применять интерактивные методы проектирования этих систем, позволяющие рассматривать ряд альтернативных вариантов СКВШ с затратами, близкими к минимальным с тем, чтобы при выборе параметров системы учитывать и степень адаптивности ее.

Известно, что неопределенность исходной информации существенно возрастает с увеличением периода времени, рассматриваемого при проектировании, и поэтому нерационально, например, проектировать СКВШ, учитывая развитие горных работ на двадцатилетний период, как это принято в настоящее время. На первом этапе проектирования необходимо выбрать оборудование стационарной части СКВШ, состоящей из станции холодильных машин (СХМ) с системой отвода тепла конденсации, контура циркуляции первичного холодоносителя, включая теплообменник высокого давления (при расположении СХМ на дневной поверхности). Причем это оборудование, режим которого значительно меньше подвержен влиянию изменения планов горных работ и условий в отдельных охлаждаемых выработках, зависит в основном от глубины разработки месторождения и производительности шахты. Поэтому выбор оборудования стационарной части СКВШ может быть произведен с достаточно малой вероятностью существенных ошибок, несмотря на его значительный срок службы. При необходимости должна учитываться возможность развития системы. Что же касается подземной части СКВШ, включающей подсистемы распределения и использования холода, то она должна проектироваться лишь на малые сроки, в течение которых имеются достаточно надежные данные о развитии горных работ. Наиболее рационально при этом использовать комплексную имитационную модель систем вентиляции и кондиционирования воздуха в шахте.

Эта модель должна описывать аэродинамические и теплофизические процессы в горных выработках (как существующих, так и проектируемых), режимы работы вентиляционного оборудования и оборудования СКВШ, технико-экономические показатели двух систем.

Идентификация параметров модели должна производиться на основании экспериментальных исследований существующей части моделируемых систем с экстраполяцией полученных данных на их проектируемую часть.

Проектирование развития подсистем распределения и использования холода СКВШ с помощью имитационной модели сводится к решению задачи условной оптимизации вещественнозначной функции (приведенных затрат) N -мерного векторного аргумента, компоненты которого представляют собой векторы: состояния систем вентиляции и кондиционирования, управления этими системами и возмущения (изменившиеся вследствие развития систем

параметры). Кроме того, компонентами аргумента являются ограничения, накладываемые на параметры систем.

Следует отметить, что эта же модель может служить для выбора оптимального управления СКВШ в случае, когда необходимые режимы работы системы меняются не вследствие развития ее, а из-за изменения параметров внешней среды.

Кроме рассмотренных задач, решение которых может обеспечить надежную нормализацию тепловых условий при использовании традиционных СКВШ, большой интерес представляют исследования возможностей и рациональной области применения нетрадиционных систем с использованием водного льда в качестве холодоносителя, воздушных и абсорбционных холодильных установок, вместо парокомпрессорных, особенно работающих на экологически вредных фреонах.

Таким образом, для решения проблемы нормализации тепловых условий в глубоких шахтах Донбасса необходимо разработать:

научно обоснованные нормы микроклимата в горных выработках, учитывающие степень тяжести выполняемых работ, тепловые характеристики спецодежды шахтеров, степень адаптации их к неблагоприятным тепловым условиям;

методы прогноза тепловых условий в горных выработках, учитывающие неопределенность ряда исходных данных и позволяющие определять вероятные диапазоны, в которых могут находиться параметры вентиляционной струи в охлаждаемых выработках;

методы проектирования СКВШ, позволяющие выбирать оборудование и режимы работы систем, обеспечивающие необходимую надежность нормализации тепловых условий в горных выработках при изменении параметров охлаждаемого воздуха в диапазоне, определяемом прогнозным тепловым расчетом вентиляции шахты;

теорию, методы и средства оптимального управления СКВШ в меняющихся условиях их работы, на базе имитационного моделирования систем.

Кроме того, необходимы исследования перспективности нетрадиционных СКВШ, упомянутых выше.

1. *Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах.*— М.: Недра, 1974.— 511 с.

2. *Цейтлин Ю. А., Ягнюк Т. В.* Вероятностный подход к оценке тепловых условий в горных выработках при проектировании систем кондиционирования воздуха в шахтах // Докл. на IV сес. Междунар. бюро по горн. теплофизике: В 2 т. — Великобритания, 1985.— Т. 2.— С. 43—51.

3. *Цейтлин Ю. А.* Оценка надежности нормализации тепловых условий в выработках глубоких шахт, оборудованных установками кондиционирования воздуха // Горн. электромеханика и автоматика.— 1990.— Вып. 58.— С. 110—115.

4. *Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха / Ю. А. Цейтлин, Т. Г. Абрамова, В. И. Могилевский и др.*— М.: Недра, 1983.— 261 с.

5. *Цейтлин Ю. А.* Проблемы нормализации тепловых условий в глубоких шахтах Донбасса // Уголь Украины.— 1990.— № 10.— С. 27—29.

6. *Цейтлин Ю. А.* Характеристика вентиляционной струи горной выработки как элемента системы кондиционирования воздуха в шахте // Горн. электромеханика и автоматика.— 1983.— Вып. 43.— С. 113—117.

7. *Цейтлин Ю. А.* Проблемы повышения эффективности мощных систем кондиционирования воздуха глубоких шахт // Сб. докл. 24 Междунар. конф. науч.-исслед. ин-тов по безопасности в горн. пром-сти: В 2 ч.— Донецк, 1991.— Ч. 2.— С. 330—339.

Ин-т геотехн. механики АН Украины,
Днепропетровск

Получено 09.01.92