Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXVIII, вып. 1, 1959 г.

РАЦИОНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ОХЛАЖДЕНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Ю. Д. Дядькин

В настоящее время на ряде шахт Сталино-Макеевского, Центрального и других районов Донецкого бассейна температура воздуха в очистных забоях (более чем в 30 лавах) превышает установленный Правилами безопасности предел (26°), достигая в летние месяцы 28—30°. Наиболее радикальным средством борьбы с высокими температурами, которые при определенной глубине горных работ становятся неизбежными, является искусственное охлаждение рудничного воздуха. При выборе системы охлаждения важно не только найти дешевый и технически удобный способ получения холода, но и правильно решить вопрос о расположении воздухоохладителей и их числе, чтобы охлаждение воздуха было вполне эффективным при наименьшем расходе холода.

Искусственное охлаждение рудничного воздуха изменяет естественный процесс теплообмена в подземных выработках. При этом общее количество тепла, получаемого рудничным воздухом, значительно возрастает. Это объясняется увеличением тепловыделений породного массива — основного источника тепла в глубокой шахте. Теплоотдача породных стенок выработки пропорциональна величине температурного напора, т. е. разности температур между породным массивом и воздушным потоком. При охлаждении воздуха величина температурного напора резко увеличивается, возрастает и теплоотдача пород. Таким образом, нагревание воздушного потока после воздухоохладителей происходит значительно интенсивнее, чем до введения охлаждающих установок. На рис. 1. показан характер изменения температуры вентиляционной струи t и суммарных тепловыделений с 1 *пог. м* выработки Σq без охлаждения рудничного воздуха *а* и при его охлаждении перед поступлением в выработку *б*.

Хладопроизводительность рудничной системы охлаждения должна быть рассчитана не только на соответствующее понижение температуры вентиляционной струи в конце очистных забоев, но и на компенсацию дополнительных тепловыделений, вызываемых охлаждением воздуха. Это условие в общем виде можно выразить как

$$\Phi \geqslant \Phi_{\text{пол}} + Q_{\text{доп}}, \ \textit{ккал/час}, \qquad (1)$$

где Φ — общая хладопроизводительность системы охлаждения, *ккал/час*;

$\Phi_{пол}$ — полезный расход холода, необходимый для охлаждения вентиляционной струи в конце очистного забоя от естественной $t_к$ до предельно-допустимой $t_{пр}$ температуры, *ккал/час*;

$Q_{доп}$ — дополнительные тепловыделения на пути от воздухоохладителя до конца очистного забоя, вызываемые охлаждением воздуха, *ккал/час*.

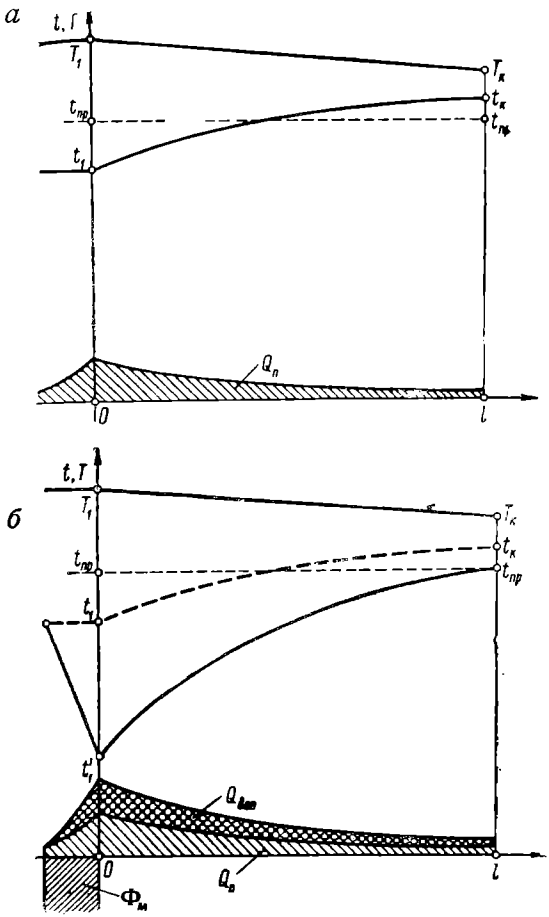


Рис. 1. Характер изменения температуры вентиляционной струи и удельных тепловыделений горных пород по длине выработки без охлаждения *а* и при охлаждении воздуха перед поступлением в выработку *б*:

t_1 и $t_к$ — температура воздуха в начале и конце выработки; $t_{пр}$ — предельно-допустимая температура; t_1' — необходимая температура охлажденного воздуха; T_1 и $T_к$ — температура горных пород в начале и конце выработки; $Q_п$ — тепловыделения горных пород; $Q_{доп}$ — дополнительные тепловыделения, вызываемые охлаждением воздуха; $\Phi_м$ — расход холода; l — длина выработки

Величина $\Phi_{пол}$ может быть определена выражением

$$\Phi_{пол} = Gc_р(t_к - t_{пр}) + rG(d_к - d_{пр}), \text{ ккал/час}, \quad (2)$$

где G — количество воздуха, проходящего по очистному забою, *кг/час*;

$c_р$ — удельная теплоемкость воздуха, *ккал кг* град;

r — удельная теплота парообразования, *ккал/кг*;

$t_к$ и $d_к$ — естественные температура и влагосодержание воздуха в конце очистного забоя;

$t_{пр}$ — предельно-допустимая температура рудничного воздуха, град.;

$d_{пр}$ — влагосодержание воздуха при $t_{пр}$, *г/кг*.

Чем меньше дополнительных тепловыделений вызывает система охлаждения, тем экономичнее она с точки зрения использования холода. Отношение полезного расхода холода к общей хладопроизводительности системы охлаждения рудничного воздуха можно назвать коэффициентом использования холода (к. и. х.)

$$\text{к. и. х.} = \frac{\Phi_{пол}}{\Phi_{пол} + Q_{доп}} = \frac{\Phi_{пол}}{\Phi} \quad (3)$$

Поскольку величина дополнительных тепловыделений, вызываемых охлаждением вентиляционной струи, пропорциональна увеличению температурного напора $\Delta t = T - t$, надо стремиться к тому, чтобы значения температурного напора по всему вентиляционному пути до конца очистных забоев были минимальными. Это можно обеспечить, оставляя возможно более высокой температуру воздуха (разумеется, не выше величины $t_{пр}$), так как температура породного массива определяется глубиной выработок и не поддается регулированию. С приближением воздухоохладителей к очистным

Таблица 1

Технико-экономические показатели по некоторым системам охлаждения рудничного воздуха

Рудник или шахта	Тип и расположение холодильной установки	Расположение воздухоохладителя	Общая хладопроизводительность системы, *ккал/час*	Стоимость 1 *ккал* холода	Температура воздуха в конце очистных забоев (по сухому $t_с$ и по мокрому $t_м$ термометрам), град.		Полезный расход холода, *ккал/час*	К.и.х.	Стоимость 1 *ккал* полезно расходуемого холода, коп.
					до охлаждения	после охлаждения			
„Сити Дип" (Ю. Африка) [8, 9]	Аммиачная, на поверхности	На поверхности	20 000 000	0,000009 англ. фунт ≈ 0,01 коп. *	$t_с = 32,2$ $t_м = 30,4$	$t_с = 31,6$ $t_м = 28,0$	2 580 000	0,128	0,078
„Синдерелла" ЕРПМ (Ю. Африка) [8]	Фреоновая, на рабочем горизонте	На рабочем горизонте	6 000 000	0,0000103 англ. фунт ≈ 0,0115 коп.	$t_с = 31,0$ $t_м = 28,1$	$t_с = 30,0$ $t_м = 27,0$	1 060 000	0,178	0,065
„Рье дю Кер" (Бельгия) [8, 10]	Аммиачная, на поверхности	На поверхности и на рабочем горизонте	13 300 000	0,00173 бельг. фр. ≈ ≈ 0,0138 коп. **	$t_{эф} = 35,0$***	$t_{эф} = 27,0$	3 500 000	0,262	0,053
„Ле Льежуа" лава 115 (Бельгия) [7, 8]	Фреоновая, на рабочем горизонте	Перед лавой	350 000	0,00144 бельг. фр. ≈ ≈ 0,0115 коп.	$t_с = 33,4$ $t_м = 28,6$	$t_с = 32,0$ $t_м = 26,0$	137 000	0,390	0,030
„Ле Льежуа" (Бельгия) [11]	1. Аммиачная, на поверхности. 2. Фреоновая, на рабочем горизонте	Перед лавой и в лаве	2 441 000	0,00125 бельг. фр. ≈ ≈ 0,010 коп.	$t_{эф} = 33,4$	$t_{эф} = 28,3$	1 009 000	0,415	0,24
Шахта № 17—17-бис, 13-я западная лава, проект (Донбасс) [5]	Фреоновая, на рабочем горизонте	Перед лавой	593 000	0,0114 коп.	$t_с = 31,2$	$t_с = 25,0$	254 000	0,43	0,266

Примечание. Стоимостные показатели получены переводом в рубли иностранной валюты и могут рассматриваться только как ориентировочные.

* По официальному курсу 1957 г. 1 английский фунт = 11 руб. 20 коп.
** По официальному курсу 1957 г. 1000 бельгийских франков = 8 руб.
*** Бельгийская эффективная температура $t_{эф} = 0,1\ t_с + 0,9\ t_м$, град.

Таблица 2

Характеристика расчетных участков и тепловые расчеты вентиляционного пути для лавы пласта Куцый на горизонте 1560 *м* шахты „Горловская-Глубокая"

Расчетный участок вентиляционного пути горизонта 1560 *м*	Длина участка, *м*	Температура породного массива в конце участка, град.	Площадь поперечного сечения выработки, $м^2$	Периметр поперечного сечения выработки, *м*	Количество воздуха по участку, $м^3/сек$	Среднее время проветривания выработки, час	Температура вентиляционной струи, град.				Температура, необходимая для обеспечения в конце лавы пласта Куцый, 25°	
							в январе		в июле			
							в начале участка	в конце участка	в начале участка	в конце участка	в начале участка	в конце участка
Воздухоподающий ствол	840	30,4	50,2	24,4	512	53 × 8700	2,0	6,4	23,2	23,8	Отрицательная	Отрицательная
Капитальный квершлаг горизонта 840 *м*	1120	30,4	25×2	20	197×2	42 × 8700	6,4	8,0	23,8	24,2	То же	То же
Слепой ствол	720	50,9	38,4	22	394	18 × 8700	8,0	12,0	24,2	26,8		
Этажный откаточный квершлаг горизонта 1560 *м* от слепого ствола до второго группового откаточного штрека	180	50,9	25×2	20	197×2	6 × 8700	12,0	12,5	26,8	27,05		
То же, между вторым и третьим групповыми откаточными штреками	385	50,9	25	20	206	6 × 8700	12,5	13,2	27,05	27,3		
То же, между третьим и четвертым групповыми откаточными штреками	370	50,9	10	13	56,7	6 × 8700	13,2	14,1	27,3	27,8		
Четвертый групповой откаточный штрек	2350	50,9	10	13	39,2	3 × 8700	14,1	21,2	27,8	30,8		0,3
Участковый откаточный квершлаг пласта Куцый	120	50,9	5	9	21,8	0,6 × 8700	21,2	22,0	30,8	31,1	0,3	2,2
Пластовый откаточный штрек пласта Куцый	336	50,9	5,4	9,2	21,8	0,3 × 8700	22,0	24,6	31,1	32,0	2,2	8,1
Лава пласта Куцый	145	47,4	4,5	12	18,2	12	24,6	32,1	32,0	34,6	8,1	25,0

забоям величина необходимого понижения температуры вентиляционной струи сокращается. Следовательно, для повышения к. и. х. рудничной системы охлаждения и сокращения ее необходимой хладопроизводительности необходимо располагать воздухоохладители как можно ближе к очистным забоям. При этом охлаждение рудничного воздуха раньше, чем он нагреется до $t_{пр}$, преждевременно и влечет за собой неоправданное увеличение расхода холода.

Как видно из табл. 1, охлаждение рудничного воздуха на поверхности, широко применяемое в зарубежной практике [2, 8, 9], малоэффективно и неэкономично (к. и. х. $\approx 0{,}128$). Значительно более экономичными, с точки зрения использования холода, являются местные системы охлаждения воздуха перед очистными забоями, однако и в этих системах значения к. и. х. не превосходят 0,39—0,43, т. е. на компенсацию дополнительных тепловыделений $Q_{доп}$ расходуется более половины общей хладопроизводительности установок.

С приближением воздухоохладителей к очистным забоям снижается также и стоимость 1 *ккал* полезно расходуемого холода (стоимость 1 *ккал* холода в холодильной установке, деленная на величину к. и. х.).

Необходимая хладопроизводительность рудничных холодильных установок может быть значительно сокращена при ступенчатом или многократном охлаждении вентиляционной струи. Первый воздухоохладитель располагается в том пункте вентиляционного пути, где рудничный воздух нагревается до $t_{пр}$ При этом производится сравнительно небольшое понижение температуры вентиляционной струи, достаточное, однако, для того, чтобы на пути к следующей ступени охлаждения воздух нагревался не более чем до величины $t_{пр}$ Таким образом, ступенчатый режим охлаждения позволяет поддерживать по всему вентиляционному пути шахты сравнительно высокие температуры, избежать резких увеличений температурного напора Δt, сократить неизбежное увеличение тепловыделений $Q_{доп}$ и повысить к. и. х. системы охлаждения рудничного воздуха. Кроме того, исключаются резкие колебания температуры вентиляционной струи.

Чтобы судить об эффективности перехода к ступенчатому расположению воздухоохладителей, рассмотрим результаты сравнения различных систем охлаждения рудничного воздуха для условий проекта шахты «Горловская-Глубокая» — наиболее глубокой из шахт-новостроек Донбасса [6]. В табл. 2 приведена характеристика расчетных участков вентиляционного пути и результаты тепловых расчетов по нашим формулам [3]:

$$t_к = T_к + \frac{B+K}{A} - \left(\Delta t_1 + \frac{B+K}{A}\right) e^{-Al}, \text{ град.;} \qquad (4)$$

$$t_1 = T_1 + \frac{B+K}{A} - \left(\Delta t_к + \frac{B+K}{A}\right) e^{Al} \text{ град.,} \qquad (5)$$

где t_1 и $t_к$ — температура воздуха в начале и конце расчетного участка, град.;

T_1 и $T_к$ — температура пород в начале и конце расчетного участка, град.;

Δt_1 и $\Delta t_к$ — температурный напор в начале и конце расчетного участка, град.;

l — длина расчетного участка, *м*;

$$A = \frac{k_т U}{G(c_р + rn)}; \; B = \frac{\sum Q}{G(c_р + rn)l}; \; K = \frac{T_1 - T_к}{l};$$

$k_т$ — коэффициент нестационарного теплообмена, *ккал/м²·град·час*;

U — периметр выработки, *м*;

n — коэффициент, учитывающий зависимость изменения влагосодержания воздуха от его температуры, относительной влажности и барометрического давления [3];

$\sum Q$ — суммарные тепловыделения на участке l от абсолютных источников тепла (окислительные процессы, адиабатическое сжатие или расширение воздушного столба, трение в механизмах, электрические потери, тепловыделения людей и т. д.), *ккал/час*.

Результаты тепловых расчетов показывают, что расположение воздухоохладителей на поверхности, в околоствольном дворе или на откаточном штреке оказывается в данном случае невозможным, так как требует охлаждения вентиляционной струи до отрицательных температур. Для сравнения выбраны следующие схемы расположения воздухоохладителей (рис. 2) *а* — на пластовом штреке перед лавой; *б* — в околоствольном дворе и перед лавой (2 ступени охлаждения); *в* — в околоствольном дворе, перед участковым квершлагом и перед лавой (3 ступени охлаждения); *г* — в околоствольном дворе, перед участковым квершлагом, перед лавой и в средней части лавы (4 ступени охлаждения); *д* — в околоствольном дворе, в начале группового штрека, перед участковым квершлагом, перед лавой и в средней части лавы (5 ступеней охлаждения). Сравнение проведено для условий июля при максимальном удалении очистных работ от воздухоподающего ствола.

Как видно из табл. 3, где приведены результаты сравнения, с увеличением числа ступеней охлаждения существенно снижается необходимая хладопроизводительность, возрастает к. и. х. системы охлаждения, а тепловые условия в выработках рабочего горизонта становятся более равномерными. Охлаждение рудничного воздуха только перед лавой требует на 68% большего расхода холода, чем при многоступенчатом охлаждении (см. рис. 2, схема *д*) и оставляет недопустимо высокой температуру вентиляционной струи в выработках, предшествующих очистному забою (2,68—32,0°). При этом тепловые условия в лаве также нельзя признать благоприятными, учитывая слишком большой перепад температур по длине очистного забоя: от 8,1 до 25° Последний недостаток сохраняется и при ступенчатом охлаждении воздуха по вариантам *б* и *в*. Вполне благоприятные тепловые условия по всему вентиляционному пути от ствола до конца лавы обеспечиваются только при вариантах *г* и *д*, когда одна из ступеней охлаждения воздуха размещается в пределах очистного забоя. Увеличение числа воздухоохладителей в выработках, предшествующих лаве, приводит к сравнительно небольшой экономии холода и выгодно в основном с точки зрения выравнивания температур вентиляционной струи, что видно из сравнения вариантов *б* и *в* или *г* и *д*. Дополнительное охлаждение воздуха в пределах очистного забоя, напротив, позволяет резко снизить необходимый расход холода.

Таким образом, сравнение различных вариантов расположения воздухоохладителей подтверждает высказанные выше положения о целесообразности и неизбежности, при большой глубине горных работ, ступенчатого охлаждения рудничного воздуха.

В настоящее время в глубоких шахтах Донбасса охлаждение рудничного воздуха требуется только в очистных забоях, поскольку при достигнутой глубине рабочих горизонтов (700—900 *м*) температура вентиляционной струи в предшествующих лавам выработках, как правило, не превышает установленных пределов. Следовательно, если борьба

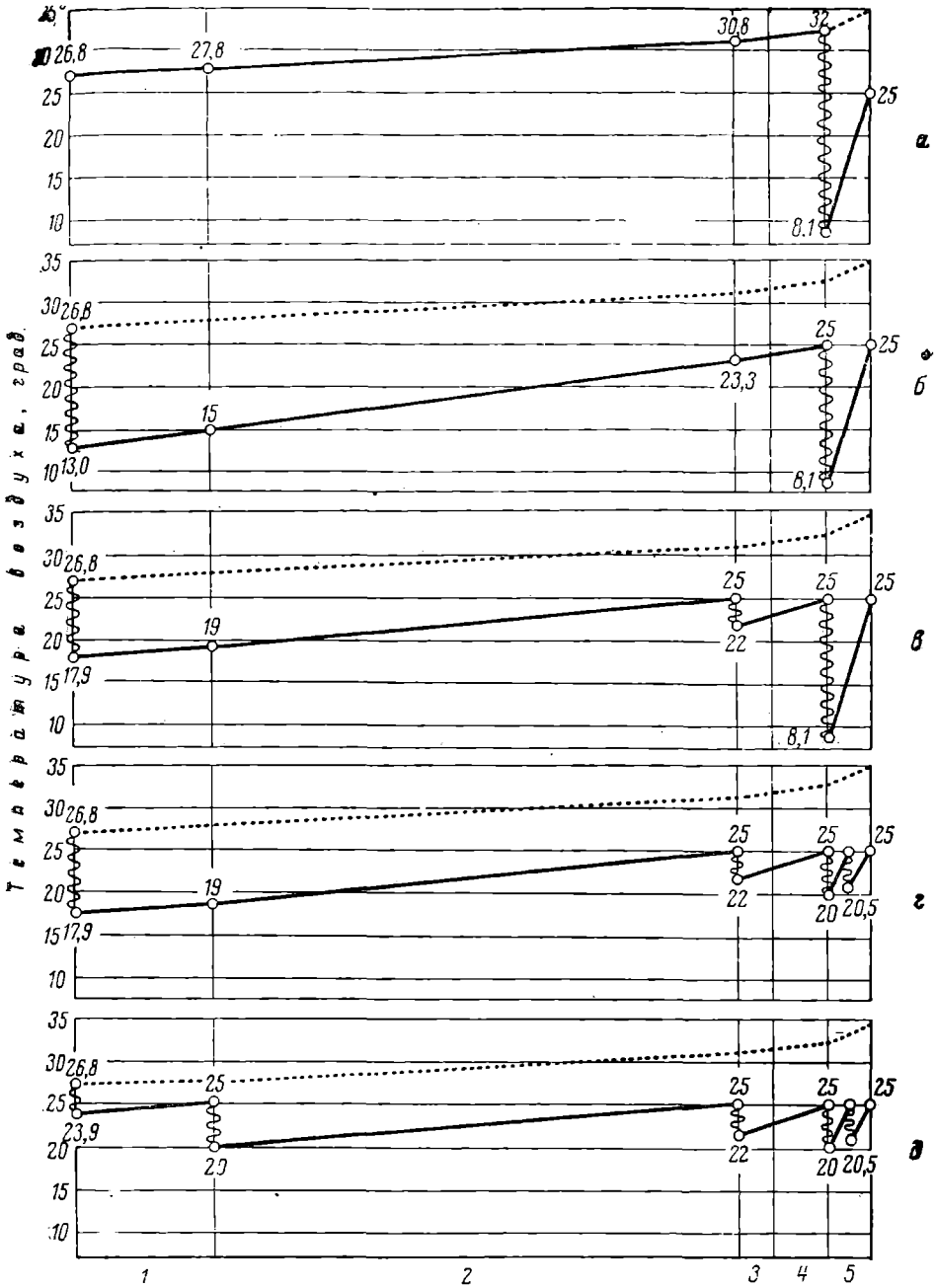


Рис. 2. Изменение температуры вентиляционной струи в выработках горизонта 1560 *м* шахты «Горловская-Глубокая» при различных вариантах расположения воздухоохладителей:

1 — этажный квершлаг; *2* — групповой откаточный штрек; *3* — участковый квершлаг; *4* — пластовый откаточный штрек; *5* — лава пласта Куцый (пунктиром показана естественная температура воздуха в выработках для условий июля)

Таблица 5

Расход холода, к. и. х. и колебание температуры в выработках при различных системах охлаждения воздуха

Вариант расположения воздухоохладителей (см. рис. 2)	Колебание температуры воздуха в выработках рабочего горизонта, град.		Суммарный расход холода в воздухоохладителях, приходящийся на лаву пласта Куцый		Полезный расход холода (для охлаждения воздуха в конце лавы от 34,6 до 25,0°), *ккал/час*	К.в.х.
	от слепого ствола до лавы	в лаве	*ккал/час*	% к варианту *д*		
а На пластовом штреке, перед лавой	26,8—32,0	8,1—25,0	1 720 000	168	690 000	0,40
б В околоствольном дворе, перед лавой	13,0—25,0	8,1—25,0	1 839 000	179,5	690 000	0,37
в В околоствольном дворе, перед участковым квершлагом, перед лавой	17,6—25,0	8,1—25,0	1 692 000	165	690 000	0,41
г В околоствольном дворе, перед участковым квершлагом, перед лавой, в средней части лавы	17,6—25,0	20,0—25,0	1 166 000	113,5	690 000	0,59
д В околоствольном дворе, в начале группового штрека, перед участковым квершлагом, перед лавой, в средней части лавы	20,0—25,0	20,0—25,0	1 026 000	100	690 000	0,67

с высокими температурами по всему вентиляционному пути шахты является задачей более или менее отдаленного будущего, то выбор рациональной системы охлаждения воздуха в очистных забоях представляет собой насущную практическую задачу.

При охлаждении воздуха в очистном забое принципиально возможны следующие схемы расположения воздухоохладителей или «режимы охлаждения»: 1) местное охлаждение вентиляционной струи перед лавой; 2) местное охлаждение воздуха в том пункте лавы, где температура вентиляционной струи достигает предельно-допустимого значения; 3) ступенчатое охлаждение в той части лавы, где естественная температура воздуха превышает установленные пределы; 4) непрерывное охлаждение вентиляционной струи, начиная с того пункта лавы, где температура воздуха достигает величины $t_{пр}$.

Местное охлаждение воздуха перед лавой требует резкого понижения температуры вентиляционной струи в воздухоохладителях. Теплообмен между породными стенками лавы и охлажденным воздухом происходит при повышенных значениях температурного напора $\Delta t = T - t$, и тепловыделение породного массива значительно возрастает. Увеличение теплоотдачи пород в известной мере компенсируется повышением охлаждающего эффекта от испарения влаги, поскольку при интенсивном нагревании воздуха в очистном забое его влагосодержание также быстро увеличивается. Однако суммарные тепловыделения, воспринимаемые вентиляционной струей в лаве, оказываются значительно больше, чем это имело бы место без охлаждения поступающего в очистной забой воздуха (см. рис. 1).

Породные стенки лавы непрерывно обновляются с подвиганием забоя, не успевают существенно охлаждаться и имеют температуру,

весьма близкую к естественной температуре породного массива. Поэтому в очистных забоях теплообмен между породами и вентиляционной струей происходит значительно интенсивнее, чем в капитальных и подготовительных выработках. Значительно большими оказываются и дополнительные тепловыделения $Q_{доп}$, вызываемые охлаждением воздуха.

Необходимый расход холода в воздухоохладителях, расположенных перед лавой, можно выразить как

$$\Phi_м = Gc_р (t_1 - t_1') + rG (d_1 - d_1'), \text{ ккал/час}, \quad (6)$$

где t_1 и d_1 — температура и влагосодержание воздуха перед воздухоохладителем;

t_1' и d_1' — температура и влагосодержание охлажденного воздуха.

Выражение (6) можно записать в виде

$$\Phi_м = G (c_р + rn) (t_1 - t_1'), \text{ ккал/час}. \quad (7)$$

Подставим вместо t_1' ее значение из формулы (5)

$$\Phi_м = G (c_р + rn)\left[t_1 - T_1 - \frac{B+K}{A} + \right.$$

$$\left. + \left(\Delta t_к' + \frac{B+K}{A}\right) e^{Al}\right], \text{ ккал/час}. \quad (8)$$

После несложных преобразований получим формулу для непосредственного (минуя тепловые расчеты) определения необходимого расхода холода в воздухоохладителях при местном охлаждении воздуха перед лавой

$$\Phi_м = k_т Ul\left[\left(\Delta t_к' + \frac{B+K}{A}\right)\frac{e^{Al}-1}{Al} - \frac{K}{A} - \right.$$

$$\left. - \frac{t_{пр}-t_1}{Al}\right], \text{ ккал/час}, \quad (9)$$

где

$$\Delta t_к' = T_к - t_{пр}.$$

Местное охлаждение воздуха перед лавой имеет ограниченную область применения. При определенной глубине горных работ необходимая температура охлажденного перед поступлением в очистной забой воздуха оказывается значительно ниже 20° — рекомендуемого «нижнего предела» [5]. В этих условиях рассматриваемый режим охлаждения возможен лишь при сокращении длины лавы. Предельная длина очистного забоя, при которой охлаждение вентиляционной струи перед лавой обеспечивает нормальные тепловые условия

$$(t_к = t_{пр} = 25°;\ t_1' = t_{пр}' = 20°),$$

может быть определена по формуле, полученной из выражения (4),

$$l_{пр}' = \frac{2{,}3}{A} \lg \frac{T_1 - t_{пр}' + \frac{B+K}{A}}{T_к - t_{пр} + \frac{B+K}{A}}, \text{ м}, \quad (10)$$

где $t_{пр}$ и $t_{пр}'$ — предельно-допустимая температура воздуха соответственно в конце лавы и перед лавой, град.

При горизонтальном залегании температура пород по длине лавы не изменяется, т. е. $T_к = T_1$. При наклонном залегании пласта величину $T_к$ приходится выбирать ориентировочно, поскольку $T_к = T_1 - K l_{пр}$.

Таким образом, при использовании формулы (10) или аналогичной формулы В. М. Белова и Б. И. Медведева [1] может возникнуть необ-

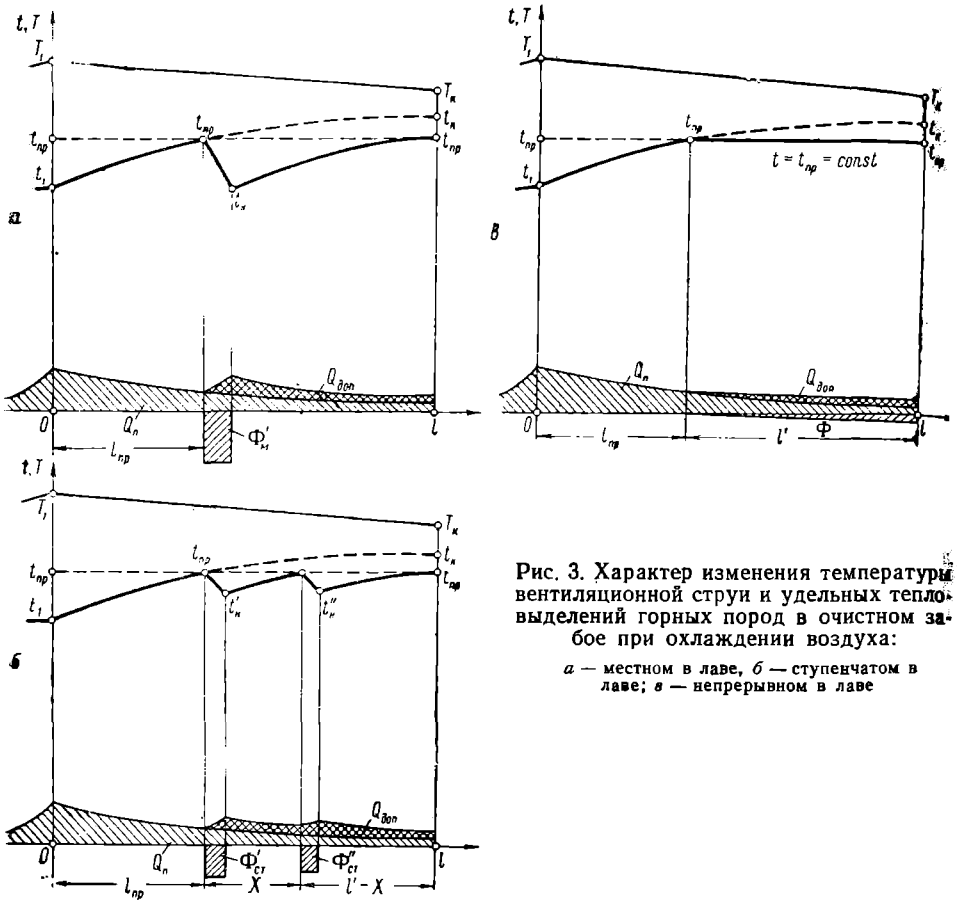


Рис. 3. Характер изменения температуры вентиляционной струи и удельных тепловыделений горных пород в очистном забое при охлаждении воздуха:

а — местном в лаве, *б* — ступенчатом в лаве; *в* — непрерывном в лаве

ходимость в повторении расчетов. От этого недостатка свободна приближенная формула

$$l'_{пр} \approx \frac{t_{пр} - t'_{пр}}{(T_1 - t'_{пр})\,A + B}, \ м, \qquad (11)$$

которая получена при замене $e^{-Al} \approx 1 - Al$. В шахтных условиях величина Al, как правило, не превосходит 0,1—0,5, поэтому указанная замена может привести к ошибкам не более чем в 10%.

Местное охлаждение воздуха в лаве. На умеренных глубинах, а в зимний период даже при весьма большой глубине рабочего горизонта, рудничный воздух нагревается до $t_{пр} = 25°$ только в пределах лавы. В этих условиях охлаждение вентиляционной струи перед лавой преждевременно и влечет за собой неоправданное увеличение необходимого расхода холода. Более экономично местное охлаждение воздуха в лаве,

где температура достигает предельной величины (рис. 3, *а*). При этом необходимый расход холода в воздухоохладителях составит

$$\Phi'_{м} = k_{т} Ul' \left[\left(\Delta t'_{к} + \frac{B+K}{A}\right)\frac{e^{Al'}-1}{Al'} - \frac{K}{A}\right], \text{ ккал/час}, \qquad (12)$$

где

$$\Delta t_{к}' = T_{к} - t_{пр};$$
$$l' = l - l_{пр}.$$

Длина участка лавы, на котором не требуется охлаждения вентиляционной струи,

$$l_{пр} = \frac{2{,}3}{A} \lg \frac{T_1 - t_1 + \frac{B+K}{A}}{T_{пр} - t_{пр} + \frac{B+K}{A}} \quad м \qquad (13)$$

или

$$l_{пр} \approx \frac{t_{пр} - t_1}{(T_1 - t_1)A + B}, \; м. \qquad (14)$$

Ступенчатое охлаждение воздуха в лаве особенно эффективно в связи с повышенной интенсивностью теплообмена между вентиляционной струей и породными стенками лавы. При этом первая «ступень охлаждения» должна быть расположена на расстоянии $l_{пр}$ от начала очистного забоя (рис. 3, *б*). Необходимый расход холода при двухступенчатом охлаждении воздуха в лаве

$$\Phi_{ст} = k_{т} Ul' \left[\left(T_1 - t_{пр} - Kl_{пр} + \frac{B+K}{A}\right)\frac{e^{AX} + e^{A(l'-X)} - 2}{Al'} - \right.$$
$$\left. - \frac{KX}{Al'}(e^{AX} - 1) - \frac{K}{A}(e^{A(l'-X)} - 1)\right], \text{ ккал/час}, \qquad (15)$$

где X — расстояние между ступенями охлаждения, *м*.

Наивыгоднейшее значение X может быть определено приближенно

$$X_{опт} \approx \frac{C}{A} - \sqrt{\left(\frac{C}{A}\right)^2 - \frac{(C+1)l'}{A}}, \; м, \qquad (16)$$

где

$$C = \frac{A(T_1 - t_{пр} - Kl_{пр}) + B}{K}$$

Формулу (16) можно использовать и при проектировании многоступенчатого охлаждения воздуха.

Непрерывное охлаждение воздуха в лаве. С увеличением числа ступеней охлаждения необходимое понижение температуры в каждой из них уменьшается. Сокращаются средний температурный напор, при котором происходит теплообмен между породными стенками лавы и вентиляционной струей, и необходимый расход холода в системе охлаждения воздуха. При бесконечно большом числе ступеней температура воздуха на охлаждаемом участке лавы остается постоянной и равной величине $t_{пр}$, происходит непрерывное охлаждение воздуха в лаве (рис. 3, *в*). Для обеспечения такого режима количество холода, передаваемое воз-

духу на каждом метре охлаждаемого участка лавы, должно быть равно сумме тепловыделений, приходящихся на 1 *м* очистного забоя

$$\Phi_{н}(x) = k_{т}U[T_{к} - t_{пр} + K(l' - x)] + \frac{\sum Q}{l} - rGd_{н}\frac{\varphi_{к}' - \varphi_{пр}'}{l'}, \text{ ккал/час·м}, \quad (17)$$

где $l' = l - l_{пр}$ — длина охлаждаемого участка лавы, *м*;

x — расстояние от начала участка l', *м*;

$d_{н}$ — влагосодержание насыщенного воздуха при $t_{пр}$ и барометрическом давлении $P_0 = 760$ *мм рт. ст.*;

$\varphi_{пр}' = \varphi_{пр}\frac{760}{P_{пр}}$ и $\varphi_{к}' = \varphi_{к}\frac{760}{P_{к}}$ — приведенная относительная влажность воздуха соответственно в начале участка l_1 и в конце лавы.

Общий необходимый расход холода при непрерывном охлаждении воздуха в лаве

$$\Phi_{н} = k_{т}Ul'\left(T_{к} - t_{пр} + \frac{Kl'}{2}\right) + \frac{\sum Ql'}{l} - rGd_{н}(\varphi_{к}' - \varphi_{пр}'), \text{ ккал/час}. \quad (18)$$

При расчете температуры породного массива и вентиляционной струи (табл. 4) длина лавы принята равной 150 *м* на пологом (10°) и крутом (60°) падении для горизонтов 800 и 1500 *м*. Количество поступающего в очистной забой воздуха условно принято постоянным $G = 57\,500$ *кг/час* (скорость воздушного потока 4 *м/сек*, ширина рабочего пространства 3,2 *м*, мощность пласта 1,0 *м*). Для пологого падения пластов величина геотермической ступени принята в 29,7 *м/град*, для крутого 33 *м/град*.

Таблица 4

Расчетные значения температуры породного массива и вентиляционной струи в начале и в конце лавы

Глубина рабочего горизонта, *м*	Угол падения пласта, град.	Температура породного массива, град.		Температура вентиляционной струи, град.		Температура перед лавой, необходимая для получения $t_{к} - t_{пр} = 25°$
		в начале лавы T_1	в конце лавы $T_{к}$	в начале лавы T_1	в конце лавы $T_{к}$	
800	60	30,8	26,8	23	24,8	23,5
800	10	33,4	32,5	23	26,3	19,3
1500	60	52,1	48,1	25	31,1	9,2
1500	10	57,1	56,2	25	33,1	5,4

Как видно из данных табл. 5, в рассматриваемых условиях непрерывное охлаждение воздуха в лаве требует в 1,5—2 раза меньше холода, чем местное охлаждение вентиляционной струи перед очистным забоем. Однако практически осуществить непрерывный режим охлаждения очень трудно, так как для обеспечения постоянной температуры воздуха по длине лавы ($t = t_{пр} = \text{const}$) холод должен подводиться равномерно по всей площади воздушного потока.

Необходимый расход холода при ступенчатом режиме оказывается несколько бо́льшим, чем при непрерывном охлаждении воздуха, но с уве-

Таблица 5

Расход холода (без учета потерь) и величина к. и. х. при различных режимах охлаждения воздуха в лаве

Охлаждение воздуха	Глубина 800 *м* при пологом (10°) падении		Глубина 1500 *м* при падении			
			крутом (60°)		пологом (10°)	
	Ф, *ккал/час*	к. и. х.	*Ф*, *ккал/час*	к. и. х.	*Ф*, *ккал/час*	к. и. х.
Местное перед лавой $Ф_м$	148 000	0,42	630 000	0,456	912 000	0,41
Местное на расстоянии $l_{пр}$ от начала лавы $Ф_м$.	102 000	0,61				
Ступенчатое (2 ступени) в лаве $Ф_{ст}$	98 100	0,63	513 000	0,56	687 000	0,54
Ступенчатое (4 ступени) в лаве $Ф_{ст}$	96 000	0,646	480 000	0,60	623 000	0,66
Ступенчатое (8 ступеней) в лаве $Ф_{ст}$	95 300	0,65	456 000	0,63	600 000	0,62
Непрерывное в лаве $Ф_н$	94 000	0,66	407 000	0,71	552 000	0,675
В конце лавы от естественной до $t_{пр} = 25°$	62 000	1,0	287 000	1,0	373 000	1,0

Примечание. На глубине 800 *м* при крутом падении охлаждения не требуется.

личением числа ступеней до 4—8 разница между этими режимами охлаждения становится несущественной.

В настоящее время для глубоких (800—1100 *м*) шахт Донбасса в качестве типовой рекомендуется система местного охлаждения вентиляционной струи перед лавой [4, 5]. В этой системе (рис. 4, *а*) холодильный агрегат (фреоновый компрессор с двигателем, испаритель и конденсатор) расположен на рабочем горизонте. Воздухоохладители установлены вблизи очистного забоя в специальной камере или уширении откаточного штрека и периодически переносятся вслед за подвиганием очистного забоя. Охлаждение конденсаторной воды производится в водоохладителях, расположенных на вентиляционном штреке лавы.

Основным недостатком местного охлаждения воздуха перед очистным забоем является необходимость резкого понижения температуры вентиляционного потока и, как следствие этого — большой перепад температур по длине очистного забоя, относительно низкий к. и. х. системы охлаждения, а на большой глубине, невозможность работать лавой достаточно большой длины. К техническим недостаткам рассматриваемой системы охлаждения следует отнести: 1) загроможденность пространства на откаточном штреке вблизи лавы, что затрудняет работу шахтного транспорта; 2) трудоемкость переноски воздухоохладителей вслед за подвиганием лавы и большой объем горных работ по проведению специальных камер для их размещения; 3) отделение водоохладителей от холодильного агрегата, значительная длина трубопроводов для циркуляции конденсаторной воды и повышенное давление воды в конденсаторе.

На рис. 4, *б* приведена принципиальная схема установки для ступенчатого охлаждения воздуха в очистном забое, при которой часть направляемого в лаву воздушного потока пропускается с помощью специального вентилятора через воздухоохладители фреоновой холодильной установки. Охлажденный воздух направляется по трубам в очистной

забой, где смешивается с основным вентиляционным потоком, понижая его температуру и влагосодержание. В качестве трубопровода для холодного воздуха могут быть использованы брезентовые, прорезиненные, полихлорвиниловые или легкоразъемные металлические трубы, под-

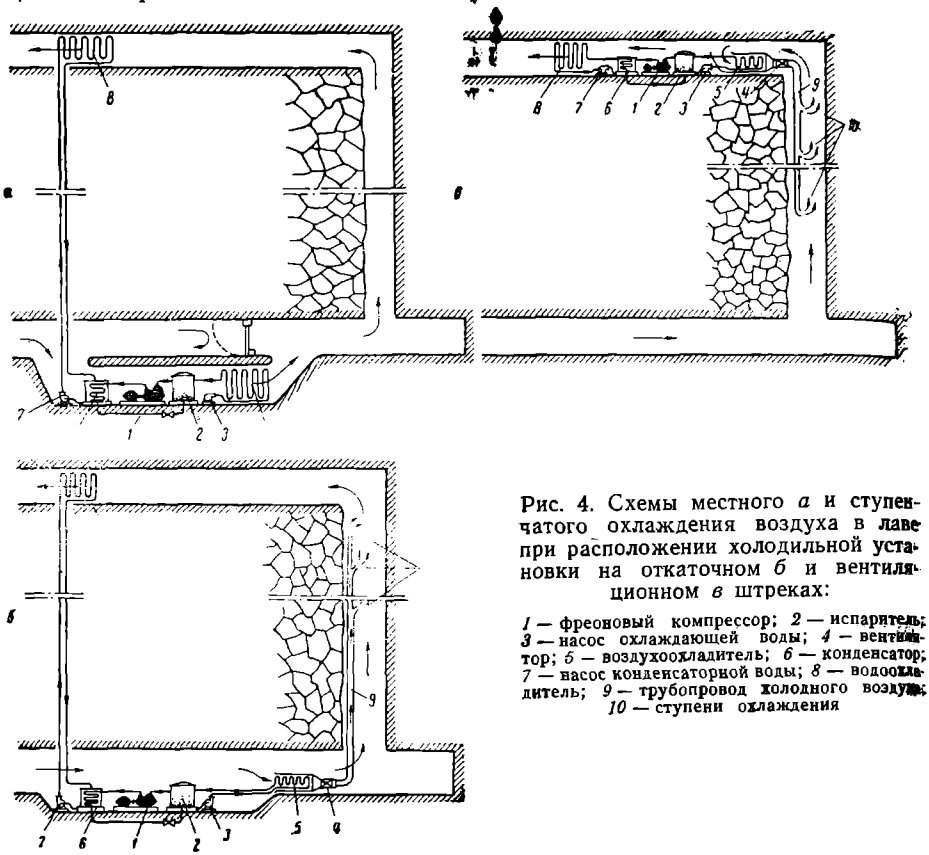


Рис. 4. Схемы местного *а* и ступенчатого охлаждения воздуха в лаве при расположении холодильной установки на откаточном *б* и вентиляционном *в* штреках:

1 — фреоновый компрессор; *2* — испаритель; *3* — насос охлаждающей воды; *4* — вентилятор; *5* — воздухоохладитель; *6* — конденсатор; *7* — насос конденсаторной воды; *8* — водоохладитель; *9* — трубопровод холодного воздуха; *10* — ступени охлаждения

вешиваемые около кровли к стойкам призабойной крепи или секциям передвижной механизированной крепи. Выпуск холодного воздуха из трубопровода производится на охлаждаемом участке лавы через специальные отверстия, обращенные в сторону кровли и расположенные в соответствии с выбранными расстояниями между ступенями охлаждения.

Трубопровод холодного воздуха переносится вслед за подвиганием очистного забоя. При этом трубы наращиваются на участке между воздухоохладителями и окном лавы или передвигаются сами воздухоохладители. Связанные с этим трудности являются основным техническим недостатком системы ступенчатого охлаждения воздуха. Вместе с тем описываемая система обладает рядом существенных преимуществ перед местными установками для охлаждения воздуха перед лавой: а) сокращаются необходимый расход холода, мощность двигателей холодильной машины, вес и габариты холодильной установки и воздухоохладителей; б) не загромождается откаточный штрек, чем создаются более благоприятные условия для работы шахтного транспорта; в) обеспечиваются значительно более равномерные тепловые условия по длине очистного забоя.

При ступенчатом охлаждении воздуха в лаве возможно расположение холодильной установки на вентиляционном штреке (рис. 4, *в*). В этом

случае компрессор холодильной машины, вентилятор и циркуляционные насосы должны быть оборудованы пневматическими двигателями, поскольку они омываются отработанной вентиляционной струей с повышенным содержанием метана.

Расположение холодильной установки на вентиляционном штреке обеспечивает ее полную независимость от погрузочных и транспортных работ на участке. Водоохладитель, конденсатор и воздухоохладитель располагаются при этом на одном горизонте, резко сокращаются длина трубопроводов, мощность насосов для циркуляции конденсаторной воды и ее давление в конденсаторе.

Таким образом, ступенчатое охлаждение воздуха в очистном забое может оказаться выгоднее местного охлаждения перед лавой не только в экономическом и гигиеническом, но и в техническом отношении.

Выводы

1. При выборе системы охлаждения рудничного воздуха целесообразно располагать воздухоохладители не в одном, а в нескольких пунктах вентиляционного пути шахты с тем, чтобы избежать резких понижений температуры вентиляционной струи и сократить до минимума необходимый расход холода. При этом охлаждение воздуха раньше, чем его температура достигает предельно-допустимого значения, преждевременно и влечет за собой неоправданное увеличение потребной хладопроизводительности холодильных установок.

С увеличением глубины рабочего горизонта (в условиях Донбасса не более 1200—1300 *м*) ступенчатое охлаждение воздуха в шахте становится необходимым.

2. Независимо от глубины рабочего горизонта, часть воздухоохладительных устройств целесообразно располагать в пределах очистных забоев. При этом наиболее рациональным является ступенчатый режим охлаждения вентиляционной струи в лаве с помощью холодного воздуха, направляемого к ступеням охлаждения по специальным трубам.

По сравнению с местным охлаждением воздуха перед очистным забоем ступенчатый режим позволяет в 1,5—2 раза сократить необходимый расход холода; уменьшить мощность двигателей, вес и габариты холодильной установки и воздухоохладителей; обеспечить значительно более равномерные тепловые условия по длине лавы, а также более удобные условия для погрузочных, транспортных и ремонтных работ на участке.

Местное охлаждение воздуха перед лавой ограничивает длину очистного забоя, поэтому при определенной глубине работ (для Донбасса не более 1000—1100 *м*) переход к ступенчатому режиму охлаждения воздуха в лаве неизбежен.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Белов В. И., Медведев Б. И. Нагрев воздуха в лаве как фактор, лимитирующий длину лавы. «Безопасность труда в промышленности», 1957, № 4.

2. Дядькин Ю. Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха. Научные доклады высшей школы. Горное дело. 1958, № 1.

3. Дядькин Ю. Д. Борьба с высокими температурами в глубоких шахтах и рудниках. Углетехиздат, 1957.

4. Щербань А. Н. Методы регулирования тепловых условий в глубоких шахтах Донбасса. Сб. Разработка угольных месторождений на больших глубинах. Углетехиздат, 1955.
5. Щербань А. Н., Кремнев О. А. и др. Охлаждение и осушение воздуха в глубоких угольных шахтах. Изд. АН УССР, 1956.
6. Технический проект шахты «Горловская-Глубокая». Рукопись. Фонды Днепрогипрошахта, 1953.
7. Bidlot R. et Ledent P. Revue Universelle des Mines, 1950, ser. 9, № 4.
8. Bromilov I. G. Iron a. Coal Trade Review, 1955, v. CLXX, № 4531—4533.
9. Deep mining of the Rand. The Mining Magazine, 1945, v. LXXIII, № 2.
10. Hanot Ch. Revue Universelle des Mines, 1955, ser. 11, № 1.
11. Rennote E. Revue Universelle des Mines, 1955, ser. 11, № 1.