Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXV, вып. 1, 1973 г.

КОНЕЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА В МНОГОРЯДНЫХ РУДНИЧНЫХ КАЛОРИФЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Л. П. Северин, К. А. Долгов

Известно, что на подавляющем большинстве рудников и шахт, расположенных в районах с суровым климатом, в зимнее время подогревают часть атмосферного воздуха, подаваемого в подземные выработки для их проветривания. Для этого при стволах и штольнях, куда поступает вентиляционная струя, сооружают, как правило, паровые калориферные установки с многорядным расположением металлических пластинчатых калориферов; последовательное движение нагреваемого воздуха в них обеспечивает необходимый перепад температур воздуха

$$\Delta t_{\text{в}} = t_{\text{под}} - t_{\text{нар}}, \qquad (1)$$

где $t_{\text{под}}$ — температура подогретого воздуха на выходе его из n-го ряда калориферов; $t_{\text{нар}}$ — температура наружного воздуха при входе его в первый ряд калориферов.

За расчетную величину температуры подогретого воздуха в таких установках обычно принимают $t_{\text{под}} \leqslant 70°$ С. Что касается расчетного значения температуры наружного воздуха, то «Нормы технологического проектирования угольных шахт» предписывают принимать величину $t_{\text{нар}}$ равной абсолютному минимуму температуры $t_{\text{абс min}}$ для данной местности. Расчетное значение $t_{\text{абс min}}$ равно: для Донбасса —36° С, для Подмосковного бассейна —38° С, для Кузнецкого, Карагандинского и Печорского бассейнов —50° С.* Отсюда следует, что температурный перепад воздуха $\Delta t_{\text{в}}$ в рассматриваемых калориферных установках, согласно формуле (1), может достигать 106—120 *град*, чем и объясняется необходимость многорядного расположения калориферов по ходу движения через них подогреваемого воздуха.

Нагревательные модели калориферов в таких установках принимаются обычно одинаковыми, а их общая поверхность нагрева ($м^2$)

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{к}}\, l\, m\, n, \qquad (2)$$

где $F_{\text{к}}$ — теплоотдающая поверхность нагрева каждого калорифера;

* Шемаханов М. М. Отепление шахтных стволов. Госгортехиздат, 1960.

m и n число калориферов в установке соответственно по фронту, высоте и глубине их расположения.

Для пластинчатых паровых калориферов отечественного производства обычно применяют трехрядное расположение, т. е. $n=3$, однако встречаются рудничные калориферные установки, имеющие $n=2$, а также $n=4$ и более.

Найдем выражение для определения температуры нагретого воздуха при выходе его из многорядной калориферной установки. Уравнение теплового баланса для одного ряда паровых калориферов может быть представлено в следующем виде:

$$Fk\left(t_{\text{п}}-\frac{t_x+t_0}{2}\right)=Gc_p(t_x-t_0), \tag{3}$$

где F — поверхность нагрева одного ряда калориферов в установке (согласно выражению (2) $F=F_{\text{общ}}/n=F_{\text{к}}lm$); k — коэффициент теплопередачи калориферов; $t_{\text{п}}$ — температура пара; t_0 — начальная температура воздуха при входе в рассматриваемый ряд калориферов; t_x — температура нагретого воздуха при его выходе из того же ряда; G — массовый расход воздуха в данном ряду; c_p — массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Решение этого уравнения относительно t_x дает следующую зависимость:

$$t_x=\frac{kFt_{\text{п}}}{Gc_p+\frac{kF}{2}}+\left(\frac{Gc_p-\frac{kF}{2}}{Gc_p+\frac{kF}{2}}\right)t_0$$

или

$$t_x=\alpha+\beta t_0, \tag{4}$$

где

$$\alpha=\frac{kFt_{\text{п}}}{Gc_p+\frac{kF}{2}}; \tag{5}$$

$$\beta=\frac{Gc_p-\frac{kF}{2}}{Gc_p+\frac{kF}{2}} \tag{6}$$

На основании зависимости (4) напишем значения t_x для n рядов

$$t_1=\alpha+\beta t_0;$$

$$t_2=\alpha+\beta t_1=\alpha+\beta(\alpha+\beta t_0)=\alpha+\alpha\beta+\beta^2 t_0;$$

$$t_3=\alpha+\beta t_2=\alpha+\beta(\alpha+\alpha\beta+\beta^2 t_0)=\alpha+\alpha\beta+\alpha\beta^2+\beta^3 t_0;$$

$$t_n=\alpha+\alpha\beta+\alpha\beta^2+\quad\quad+\beta^n t_0.$$

Откуда

$$\left.\begin{aligned} &t_1 \quad t_0 = \Delta t_1 \qquad (1 \quad \beta)\, t_0; \\ &t_2 - t_1 = \Delta t_2 = \beta\,[\alpha \quad (1-\beta)\, t_0]; \\ &t_3 - t_2 = \Delta t_3 = \beta^2\,[\alpha - (1-\beta)\, t_0]; \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \\ &t_n - t_{n-1} = \Delta t_n = \beta^{n-1}\,[\alpha - (1-\beta)\, t_0]. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Суммирование полученных разностей дает

$$t_n - t_0 = [\alpha - (1-\beta)\, t_0]\,[1 + \beta + \beta^2 + \qquad \beta^{n-1}]$$

или

$$t_n - t_0 = [\alpha - (1-\beta)\, t_0]\,\frac{1-\beta^n}{1-\beta},$$

что справедливо при значениях $\beta < 1$, как следует из выражения (6).

Подстановка в последнее равенство значений α и β из выражений (5) и (6) позволяет получить искомое значение температуры нагретого воздуха при выходе его из n-го ряда паровых калориферов

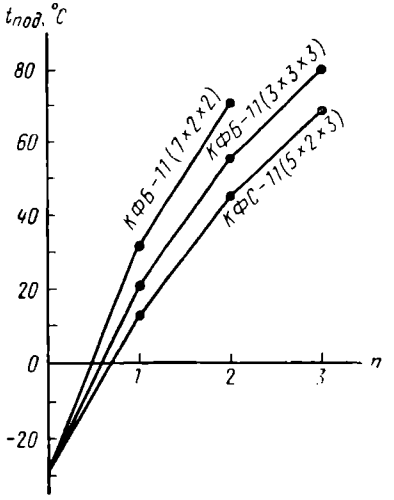
$$t_n = t_{\text{п}} - \left(\frac{G c_p - \dfrac{kF}{2}}{G c_p + \dfrac{kF}{2}}\right)^n (t_{\text{п}} - t_0)$$

или, заменяя $t_n = t_{\text{под}}$ и $t_0 = t_{\text{нар}}$, находим

$$t_{\text{под}} = t_{\text{п}} - \left(\frac{G c_p - \dfrac{kF}{2}}{G c_p + \dfrac{kF}{2}}\right)^n (t_{\text{п}} - t_{\text{нар}}). \qquad (8)$$

Данное уравнение выражает функциональную зависимость температуры подогрева воздуха от числа рядов калориферов при неизменных значениях других величин, входящих в уравнение. Так как значения n — целые числа, то эта функция является дискретной и в осях координат n, $t_{\text{под}}$ представляет собой монотонно возрастающую ломаную линию. При $n=0$ начальная ордината $t_0 = t_{\text{под}} = t_{\text{нар}} < 0$, поэтому линия располагается под осью абсцисс (см. рисунок), что физически может соответствовать, например, случаю движения наружного холодного воздуха через калориферы при их отключении от пароподводящей сети. Последовательное включение в действие отдельных рядов калориферов неизменно вызывает повышение температуры нагреваемого воздуха и при $n \longrightarrow \infty$ имеем $t_n = t_{\text{под}} \longrightarrow t_{\text{п}}$, т. е. ломаная асимптотически приближается к прямой $t_{\text{п}} = \text{const}$, что физически может соответствовать ненужному и небезопасному перегреву воздуха по сравнению с его расчетной температурой. Источником перегрева воздуха может служить не только лишний ряд калориферов, но и необоснованное завышение их общей поверхности нагрева в установке. Рассмотрим такой случай на числовом примере из книги М. М. Шемаханова (стр. 66—67).

Пример. Определить расчетом конечную температуру подогретого воздуха на выходе его из пластинчатых паровых калориферов модели КФБ-11 ($F_к = 69{,}9$ м², $f_к = 0{,}638$ м²), скомпонованных в три последовательных ряда ($n=3$) по девять калориферов в ряду ($lm = 3 \cdot 3 = 9$, $F = 69{,}9 \cdot 9 = 629$ м², $F_{общ} = Fn = 629 \cdot 3 = 1887$ м²) и предназначенных для подогрева часовой массы воздуха $G = 200\,000$ м³/ч от $t_{нар} = -30°$ С до $t_{под} = 70°$ С при средней температуре пара $t_п = 142{,}9°$ С.



Графики температуры подогрева воздуха в калориферной установке (для условий числового примера).

Решение. Массовая скорость воздуха $(v\rho) = 200\,000 : (3600 \cdot 9 \times 0{,}638) = 9{,}7$ кг/(сек · м²). Коэффициент теплопередачи $k = 4{,}186 \cdot a\,(v\rho)^q = 4{,}186 \cdot 10\,(9{,}7)^{0{,}42} = 4{,}186 \cdot 26$ кдж/(м² · ч · град) ($a=10$, $q=0{,}42$ — константы для калориферов КФБ и КФС). Подстановка приведенных значений в формулу (8) дает следующую величину искомой температуры:

$$t_{под} = 142{,}9 - \left(\frac{200\,000}{200\,000}\,\frac{1{,}0 - 26}{1{,}0 + 26}\,\frac{4{,}186}{4{,}186}\,\frac{629 \cdot 0{,}5}{629 \cdot 0{,}5}\right)^3 (142{,}9 + 30) = 81{,}2° \text{ С},$$

что значительно выше заданной температуры подогрева, равной +70° С. Для условий этого числового примера следовало бы принять трехрядную установку калориферов модели КФС-11 ($F_к = 54{,}6$ м², $f_к = 0{,}638$ м²) с компоновкой $lmn = 5 \cdot 2 \cdot 3$ ($F = 54{,}6 \cdot 10 = 546$ м², $F_{общ} = 546 \cdot 3 = 1638$ м²). В этом случае $(v\rho) = 200\,000 : (3600 \cdot 10 \cdot 0{,}638) = 8{,}7$ кг/(сек · м²); $k = 41{,}86\,(8{,}7)^{0{,}42} = 104{,}6$ кдж/(м² · ч · град);

$$t_{под} = 142{,}9 - \left(\frac{200\,000}{200\,000}\,\frac{1{,}0 - 104{,}6}{1{,}0 + 104{,}6}\,\frac{546}{546}\,\frac{0{,}5}{0{,}5}\right)^3 (142{,}9 + 30) = 70° \text{ С}.$$

При таком комплектовании калориферов получается снижение общей поверхности нагрева на $(629—546) \cdot 3 = 249$ м² и уменьшение аэродинамического сопротивления калориферов почти в 1,5 раза.

Существенным преимуществом для условий числового примера обладала бы также двухрядная установка 28 калориферов модели КФБ-11 ($lmn = 7 \cdot 2 \cdot 2 = 28$; $F = 69{,}9 \cdot 14 = 978{,}6$ м²; $F_{общ} = 978{,}6 \cdot 2 = 1957$ м². Тогда $(v\rho) = 200\,000 : (3600 \cdot 14 \cdot 0{,}638) = 6{,}2$ кг/(сек · м²); $k = 41{,}86\,(6{,}2)^{0{,}42} = 89{,}6$ кдж/(м² · ч · град);

$$t_{под} = 142{,}9 - \left(\frac{200\,000}{200\,000}\,\frac{1{,}0 - 89{,}6}{1{,}0 + 89{,}6}\,\frac{978{,}6}{978{,}6}\,\frac{0{,}5}{0{,}5}\right)^2 (142{,}9 + 30) = 72° \text{ С},$$

что близко к заданной температуре подогрева, равной +70° С.

Аэродинамическое сопротивление калориферов в данном случае в 3,3 раза ниже, чем при трехрядной компоновке 27 таких же моделей, принятой в числовом примере М. М. Шемахановым.

Подсчитанные по формулам (7) и (8) значения Δt и $t_{под}$ для каждого ряда калориферов по трем рассмотренным в числовом примере вариантам их компоновки сведены в таблицу.

Расчетная таблица к числовому примеру

Температура подогрева	Модели калориферов							
	КФБ-11			КФС-11			КФБ-11	
	Ряды калориферов							
	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й
$t_{под}$, °С	20,3	55,9	81,2	13,2	45,6	70,0	32,1	72,0
Δt, *град*	50,3	35,6	25,3	43,2	32,4	24,4	62,1	39,9
Δt, %	45,2	32,0	22,8	43,2	32,4	24,4	61,0	39,0

Табличные значения легли в основу построения трех графиков (см. рисунок). Они показывают, что тепловая нагрузка третьего ряда калориферов почти вдвое ниже, чем первого, а на долю среднего ряда приходится около 1/3 тепловой нагрузки; в двухрядной установке тепловая нагрузка между рядами распределяется примерно как 3 2.

В заключение уместно отметить, что отношение приращения температуры воздуха данного ряда к приращению предыдущего, как это следует из формулы (7), $\Delta t_k/\Delta t_{k-1} = \beta$, поскольку $\beta < 1$, то $\Delta t_k < \Delta t_{k-1}$, т. е. степень нагревания воздуха в каждом ряду калориферов, по мере его продвижения через поверхности нагрева, падает. Чем ближе значение β к единице, тем меньше отличаются друг от друга приращения температур в каждом ряду калориферов и тем лучше использование конечных ступеней нагрева в установке. Из формулы (5) видно, что величина β тем ближе к единице, чем меньше выражение $kF/2$. Однако влияние это невелико, что можно заметить из рассмотрения приведенной выше таблицы.

Выводы

1. При расчетах рудничных калориферных установок с многорядным расположением нагревательных элементов необходимо проверять конечную температуру нагретого вентиляционного воздуха, для вычисления которой выведена формула (8).

2. При компоновке отдельных паровых калориферов в агрегаты и группы следует при выборе числа последовательных рядов нагревательных элементов избегать завышения числа рядов, поскольку это оказывает существенное влияние на величину аэродинамического сопротивления воздушного тракта и на расход электроэнергии для передвижения в калориферах подогреваемого воздуха.

3. Необоснованное завышение теплоотдающих поверхностей калориферов в установке может вызвать небезопасный и ненужный перегрев воздуха, ухудшающий к тому же эксплуатационные показатели подогрева воздуха для рудничной вентиляции.