УДК 622.481

К.А. Долгов

О НЕОБХОДИМОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ШАХТНЫХ КАЛОРИФЕРНЫХ УСТАНОВОК

Отмечены недостатки применяемой методики конструкторского теплового расчета калориферных установок. Показано, что замена коэффициента теплопередачи установки на коэффициент теплопередачи калорифера может привести к недопустимому занижению необходимой поверхности нагрева установки, что в экстремальных условиях работы неминуемо вызовет ее обмерзание и выход из строя.

The disadvantages of adopted method in engineering calculation of heat in calorific devices are marked. It is shown that the replacement of the device heat transfer coefficient for the calorifier heat transfer coefficient can lead to unpermittable decrease of the necessary heated area of the device that inevitably causes its covering with ice and breakage under extreme conditions.

Калориферная установка обеспечивает нормальное функционирование шахтных подъемных установок, устраняя обмерзание и обледенение стен ствола, расстрелов, проводников, электрических кабелей, расположенных в нем, и предохраняет от обрыва канатов и заедания клети в период низких температур наружного воздуха, включая абсолютный минимум температур для данной местности. Температура воздуха, подаваемого в ствол шахты, должна находиться в пределах 2-5 ^{0}C [2].Горячим теплоносителем в шахтных калориферных установках является перегретая вода. Допускается использование насыщенного пара. Регламентированы температура обратной воды (не ниже 20 ^{0}C) и повышение ее более 70 ^{0}C [2]. Во избежание обмерзания и больших гидравлических сопротивлений скорость движения воды в трубках калорифера должна находиться в пределах 0,3-0,8 м/с [1]. Допускаемые массовые скорости воздуха в калориферных установках указываются в технических условиях для применяемой модели калорифера.

Шахтные калориферные установки отличаются от калориферных установок, применяемых в гражданском и промышленном строительстве, бóльшим количеством устанавливаемых калориферов. Для применяемых шахтных расходов воздуха и допускаемых массовых скоростей количество калориферов в установке может достигать нескольких десятков и даже сотен штук. При этом большую роль в стабильной работе установки играет гидравлическое соединение калориферов по воде, обеспечивающее скорость ее движения в заданных пределах. Наиболее частым случаем отказа является обмерзание калориферной установки в экстремальных условиях работы. Одной из причин этого может быть неточность конструкторского теплового расчета. Наибольшее распространение получила методика конструкторского теплового расчета, изложенная в работах [1, 4]. Недостатки этой методики хорошо известны:

1. Методика дает неплохие результаты лишь для однорядных калориферных установок.

2. Методика применительна только к параллельной гидравлической схеме соединения водяных калориферов.

3. Выбор величины массовой скорости воздуха из рекомендуемого диапазона произволен, что может привести к неэкономичному режиму работы калориферной установки.

4. Для надежности работы калориферной установки методика рекомендует увеличивать расчетную поверхность нагрева на 15-20 %. Методика не предусматривает поверочного теплового расчета скомпонованной калориферной установки, хотя увеличение поверхности нагрева может снизить температуру уходящей воды до недопустимых пределов.

Шахтные калориферные установки на шахтах востока и северо-востока страны в основном двухрядные и даже трехрядные (в условиях Верхоянска). Обеспечение необходимой скорости движения воды в калориферах заставляет применять гидравлическую схему последовательного соединения калориферов по воде. Для таких шахтных калориферных установок применяемая методика конструкторского теплового расчета может дать существенные погрешности. При расчете однорядных и многорядных калориферных установок по применяемой методике для определения необходимой поверхности нагрева всей установки используется формула

$$F_{уст} = \frac{Q}{k\,\Delta t_{ср}}, \qquad (1)$$

где Q - тепловая мощность установки (расход тепла); $\Delta t_{ср}$ - средняя арифметическая разность температур между водой и

воздухом; k - коэффициент теплопередачи отдельного калорифера.

Для однорядной установки при параллельном соединении калориферов по воде коэффициент теплопередачи отдельного калорифера и целого ряда в пределах допустимой точности совпадают. Для многорядных установок при параллельном соединении рядов по воде значения коэффициента теплопередачи отдельного калорифера k и установки $k_{уст}$ не совпадают, поскольку средняя разность температур для каждого ряда имеет свое значение. При этом формула (1) может дать существенную погрешность. Выражение для коэффициента теплопередачи многорядной калориферной установки при параллельном соединении рядов было получено в работе [5]:

$$k_{уст} = \frac{B}{n} \frac{1 - \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^n}{1 + \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^n}, \qquad (2)$$

где k - коэффициент теплопередачи отдельного калорифера; n - число рядов; B - коэффициент, имеющий размерность коэффициента теплопередачи,

$$B = 2C_p \frac{f_k}{F_k} \rho\upsilon; \qquad (3)$$

C_p - изобарная теплоемкость воздуха; f_k - площадь проходного сечения калорифера; F_k - площадь поверхности нагрева калорифера; $\rho\upsilon$ - массовая скорость воздуха.

Легко проверить, что при $n = 1$ из выражения (2) можно получить $k_{уст} = k$.

Для двухрядной установки при $n = 2$

$$k_{уст} = \frac{B}{2} \frac{1 - \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^2}{1 + \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^2} = \frac{B^2 k}{B^2 + k^2}$$

или

$$k_{уст} = k \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{B}\right)^2}. \qquad (4)$$

Для трехрядной установки при $n = 3$

$$k_{уст} = \frac{B}{3} \frac{1 - \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^3}{1 + \left(\frac{B-k}{B+k}\right)^3} = \frac{1}{3} \frac{3B^2k+k^3}{B^2+3k^2}$$

или

$$k_{уст} = k \frac{1+\frac{1}{3}\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+3\left(\frac{k}{B}\right)^2} . \qquad (5)$$

Как следует из выражений (4) и (5), $k_{уст} < k$. Найдем относительную ошибку $\delta_к$, допускаемую для многорядных калориферных установок, при определении необходимой поверхности нагрева по формуле (1) при замене коэффициента теплопередачи $k_{уст}$ коэффициентом теплопередачи калорифера.

Для двухрядной установки из выражения (4) имеем

$$\frac{k_{уст}}{k} = \frac{1}{1+\left(\frac{k}{B}\right)^2},$$

откуда

$$1 - \frac{k_{уст}}{k} = 1 - \frac{1}{1+\left(\frac{k}{B}\right)^2} = \frac{\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+\left(\frac{k}{B}\right)^2}$$

или

$$\delta_k = \frac{k-k_{уст}}{k} 100\% = \frac{100\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+\left(\frac{k}{B}\right)^2} . \qquad (6)$$

Аналогично для трехрядной установки из выражения (5) найдем

$$\frac{k_{уст}}{k} = \frac{1+\frac{1}{3}\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+3\left(\frac{k}{B}\right)^2},$$

откуда

$$1 - \frac{k_{уст}}{k} = 1 - \frac{1+\frac{1}{3}\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+3\left(\frac{k}{B}\right)^2} = \frac{\frac{8}{3}\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+3\left(\frac{k}{B}\right)^2}$$

или

$$\delta_k = \frac{k_{уст}}{k} 100\% = \frac{266{,}7\left(\frac{k}{B}\right)^2}{1+3\left(\frac{k}{B}\right)^2} . \qquad (7)$$

Относительная ошибка в определении необходимой поверхности нагрева $\delta_{F\,уст} = -\delta_k$. Минус показывает на занижение необходимой поверхности нагрева.

Найдем выражение для отношения k/B . Коэффициент теплопередачи калорифера находится по формуле [1, 4]

$$k = a(\rho\upsilon)^q w^r , \qquad (8)$$

где a, q, r - опытные значения коэффициента и показателей степени, зависящие от данной модели калорифера; w - скорость движения воды в трубках калорифера.

Подставляя в отношение k/B выражения (8) и (3), найдем

$$\frac{k}{B} = \frac{a(\rho\upsilon)^q\ w^r}{2C_p\frac{f_k}{F_k}\rho\upsilon} = C\frac{w^r}{(\rho\upsilon)^{1-q}} , \qquad (9)$$

где C - коэффициент, зависящий в основном от модели калорифера, $C = \dfrac{a}{2C_p\frac{f_k}{F_k}}$.

Величину коэффициента C в формуле (9) для данной модели калорифера можно принять постоянной. В настоящее время основным поставщиком калориферов является Костромской калориферный завод, выпускающий две модели калориферов: среднюю КСк-3 и большую КСк-4. Для модели КСк-3 имеем [3] : $a = 29{,}3$; $q = 0{,}437$; $r = 0{,}168$; $f_k/F_k = 0{,}02$. Для модели КСк-4 имеем [3] : $a = 25{,}5$; $q = 0{,}496$; $r = 0{,}16$; $f_k/F_k = 0{,}0152$. Рекомендуемые для обоих моделей массовые скорости $\rho\upsilon$ = 1,5-7 кг/(м^2·с).

Приняв изобарную теплоемкость воздуха $C_p = 1007$ Дж/(кг·К), получим для калориферов КСк-3

$$\frac{k}{B} = 0,727 \frac{w^{0,168}}{(\rho\upsilon)^{0,563}}; \qquad (10)$$

для калориферов КСк-4

$$\frac{k}{B} = 0,833 \frac{w^{0,16}}{(\rho\upsilon)^{0,504}}. \qquad (11)$$

Отношение k/B в выражениях (10) и (11) растет с увеличением скорости движения воды в калориферах и уменьшением массовой скорости воздуха. Также ведет себя абсолютная величина относительной ошибки в определении необходимой поверхности нагрева. Минимальная по абсолютной величине относительная ошибка $\delta_{F\,уст}$ будет при $\rho\upsilon = 7$ кг/(м^2·с) и $w = 0,3$ м/с, максимальная - при $\rho\upsilon = 1,5$ кг/(м^2·с) и $w = 0,8$ м/с. Найденные по формулам (6), (7), (10) и (11) абсолютные значения минимальных и максимальных относительных ошибок при определении поверхности нагрева приведены в таблице.

Таблица абсолютных величин относительных ошибок при определении необходимой поверхности нагрева

Модель калорифера	Двухрядная установка		Трехрядная установка	
	$\delta_{F\,уст\ min}$, %	$\delta_{F\,уст\ max}$, %	$\delta_{F\,уст\ min}$, %	$\delta_{F\,уст\ max}$, %
КСк-3	3,8	23,7	9,4	42,9
КСк-4	5,8	30,3	13,9	49,3

Данные таблицы показывают, что возможное занижение необходимой поверхности нагрева от замены коэффициента теплопередачи установки коэффициентом теплопередачи калорифера согласно применяемой методике конструкторского теплового расчета калориферной установки может достигать при минимальной массовой скорости воздуха и максимальной скорости движения воды для двухрядной установки 23,7-30,3 % , а для трехрядной 42,9-49,3 %. Это в экстремальных условиях работы неминуемо приведет к обмерзанию и выходу калориферной установки из строя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альбом оборудования. Калориферы и агрегаты / ГПИ Сантехпроект. М., 1964.

2. Руководство по техническому обслуживанию калориферных установок шахт/Под ред. Н.И.Карасева. М.: Недра, 1984.

3. Строительный каталог № 8. Раздел 81. Калориферы/Сантехниипроект. М., 1990.

4. Справочник проектировщика.Ч.2. Вентиляция и кондиционирование воздуха/Под ред.И.Г.Староверовой. М.: Стройиздат, 1977.

5. *Талиев В.Н.* Приближенный метод расчета коэффициента теплопередачи калориферной установки//Водоснабжение и санитарная техника. 1957. № 2.