

УДК 697.273.8

Ахрамович А.П., Дмитриев Г.М., Колос В.П.

Институт энергетики НАН Беларуси

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕХОВ

Запропоновано принцип оптимізації параметрів інфрачервоних систем обігріву виробничих цехів, що полягає в мінімізації витрат на їх створення і експлуатацію при дотриманні санітарних і технологічних норм.

Предложен принцип оптимизации параметров инфракрасных систем обогрева производственных цехов, заключающийся в минимизации затрат на их создание и эксплуатацию при соблюдении санитарных и технологических норм.

The principle of parameters optimization of infra-red heating systems developed for production workshops offered. It consists in minimization of charges on their making and operation at maintenance of sanitary and technological norms.

C_p – удельная теплоемкость воздуха;
 E_{inf} – лучистый поток от инфракрасных излучателей;
 E_1, E^*, E^{**} – предельные значения лучистого потока, связанные с теплоощущениями человека и технологией производства;
 e_j – расстояние от выбранной продольной стены до линии, образованной продольными осями излучателей j -го ряда;
 G – расход вентиляционного воздуха;
 L_0, L_L – расстояния от торцевых стен до центров ближайших излучателей;
 L, B, H – длина, ширина и высота цеха;
 l, b – длина и ширина излучателя;
 M – число рядов излучателей в цехе;
 n_k – число излучателей в k -ом ряду;
 s' – стоимость одного джоуля электрической энергии или сжигаемого газа, выделяющего один джоуль тепла;
 s'' – стоимость одного джоуля тепловой энергии;
 T_{v1}, T_{v2} – температура подаваемого в помеще-

ние и отводимого вентиляционного воздуха;
 T_{out} – температура наружного воздуха;
 Q_{EQ}^{out} – мощность тепловыделения от людей и технологического оборудования;
 $\Delta Q, \Delta Q^*, \Delta Q^{**}$ – дисбаланс энергии в теле человека и его допустимые пределы;
 q_{\rightarrow} – поток тепла через ограждающие конструкции;
 Δ_k – расстояние между центрами соседних излучателей k -ого ряда;
 Θ – расход денежных средств за отопительный сезон на оплату энергии, потребляемой ИК-системой и вентиляцией;
 $\vartheta_{EQ}, \vartheta_W, \vartheta_B$ – затраты, обусловленные износом оборудования, расходы на оплату труда обслуживающего персонала и потери поступлений по банковскому депозиту за период эксплуатации системы, отнесенные к продолжительности этого периода;
 Σ – площадь ограждающих конструкций;
 τ – время;
 Φ – продолжительность отопительного сезона.

Для обогрева цехов промышленных предприятий больших размеров, как правило, используется воздушная система отопления, совмещенная с вентиляцией. Ее основной недостаток известен. Из-за низкой теплоемкости воздуха для переноса тепла требуется его огромная масса. Для того, чтобы подвижность воздуха в рабочей зоне находилась в пределах санитарных норм, воздухораспределительные устройства устанавливают выше этой зоны, и большая часть тепла уносится восходящими

потоками наружу здания.

К настоящему времени одним из наиболее энергоэффективных способов обогрева больших помещений является применение инфракрасных систем (ИК-систем). Принцип их работы заключается в преобразовании энергии электромагнитных волн, генерируемых излучателями, в тепло при попадании на поверхности ограждающих конструкций и предметов, находящихся в помещении. Они имеют ряд преимуществ, которые не присущи тра-

диционным (водяной и воздушной) системам отопления. В первую очередь, незначительный градиент температуры по высоте помещения, малые конвективные токи, локальность теплового воздействия. В силу этих особенностей тепловые потери через наружные ограждения гораздо меньше, чем при работе традиционных систем, что обуславливает энергетическую эффективность ИК-обогрева.

Инфракрасные излучатели (газовые, электрические) нашли широкое применение в промышленности для обогрева производственных цехов. Однако, зачастую они устанавливаются далеко не самым рациональным образом. В результате снижается их эффективность и не поддерживаются санитарные нормы.

Рассмотрим принцип оптимизации ИК-систем. В качестве целевой функции установим затраты на создание системы и ее эксплуатацию. Математически оптимизационную задачу можно записать, как:

$$\Theta + (\vartheta_{EQ} + \theta_W + \vartheta_B)\Phi = \min; \quad (1)$$

$$\Theta = \int_0^{\text{def } \Phi} \left\{ s' \left[\iint_{\Sigma} \bar{q} d\bar{\Sigma} - Q_{EQ} + G C_p (T_{V2} - T_{V1}) \right] + s'' G C_p (T_{V1} - T_{out}) \right\} d\tau.$$

Будем считать, что цех имеет форму прямоугольного параллелепипеда длиной L , шириной B и высотой H . Инфракрасные излучатели смонтированы излучающей поверхностью вниз параллельно полу. Они расположены в M рядов по n_k излучателей так, что их продольные оси образуют линию, параллельную продольной оси цеха. Общая расстановка излучателей описывается соотношениями:

$$\Delta_k = \frac{L - L_0 - L_L}{n_k - 1}; \quad \Delta_k > l; \quad (L_0 \wedge L_L) > l/2; \quad k = \overline{1, M}; \quad (2)$$

$$e_{j+1} - e_j > b; \quad (e_j \wedge e_M) > 0; \quad (e_1 \wedge B - e_M) > b/2; \quad j = \overline{1, M-1}.$$

Тепловые потери q через наружные ограждения находятся из решения системы уравнений теплопереноса в цехе. Для построения математической модели цех разделен по высоте на зоны: рабочую, где находятся станки

и люди, и остальной объем, находящийся выше ее. Теплоперенос в этих зонах носит разный характер: в верхней он описывается уравнениями турбулентной атмосферы [1], в нижней, загруженной оборудованием – уравнениями движения в крупноячеистой анизотропно-пористой среде [2]. Связь между параметрами воздуха в зонах устанавливается с помощью условий сопряжения на их границе.

При описании теплопереноса в цехе принято квазистационарное приближение. Нестационарность процесса обогрева, связанная с изменениями температуры наружного воздуха и графиком работы цеха (рабочий и нерабочий периоды, различающиеся температурами), учитывается в граничных условиях на наружных ограждениях. Распространение инфракрасного излучения подчиняется уравнению Бугера, учитывающему характеристики излучения (мощность, спектр, индикатриса) и содержание влаги в воздухе, которая оказывает доминирующее влияние на его поглощение.

Ограничения на тепловую обстановку в цехе обусловлены теплоощущениями человека и технологией производства [3]. Первое ограничение связано с поддержанием комфортного функционального и теплового состояния организма без напряжения системы терморегуляции. Дисбаланс между выделяемой в теле человека энергией и отводимой от него должен находиться в допустимых пределах:

$$\Delta Q^* \leq \Delta Q \leq \Delta Q^{**}, \quad (3)$$

а лучистый поток не должен превышать допустимого уровня:

$$E_{inf} \leq E_1. \quad (4)$$

С другой стороны, в определенном диапазоне:

$$E^* \leq E_{inf} \leq E^{**} \quad (5)$$

инфракрасные лучи оказывают положительное действие на технологические процессы [4]. Рассматривая только случай, когда $E_1 \geq E_{\min}$, объединим неравенства (4), (5) и получим ог-

раничение на величину лучистого потока в виде:

$$E^* \leq E_{inf} \leq \begin{cases} E_1 & (\text{при } E_1 \leq E^{**}); \\ E^{**} & (\text{при } E_1 > E^{**}). \end{cases} \quad (6)$$

Величины ΔQ , E_1 , E^* , E^{**} зависят от характеристик одежды, активности деятельности человека, температуры и подвижности окружающего воздуха.

В результате решения оптимизационной задачи (1) с ограничениями в виде неравенств (2), (3), (6) и с учетом законов теплопереноса и распространения инфракрасного излучения находятся мощность и количество излучателей, параметры их расстановки в цехе (3), распределение мощности по излучателям, температура и расход подаваемого вентиляционного воздуха, обеспечивающие минимальные затраты на обогрев цеха за отопительный сезон при соблюдении санитарных и технологических норм.

Эффективная эксплуатация современных технологических линий требует поддержания (порой весьма жесткого) определенного микроклимата в рабочей зоне. Так, для качественного нанесения эмали на проволоку необходима сухость ее поверхности, несмотря на большую влажность в цехе, для полирования линз – оптимальная для применяемой полироли температура воздуха и низкий перенос пыли в рабочей зоне. В ряде случаев традиционные системы отопления не способны создать нужных микроклиматических условий, а газовые излучатели нельзя использовать по пожарным или иным условиям, либо они не позволяют достичь желаемой эффективности, поскольку процесс горения требует подачи дополнительного количества воздуха, что приводит к нерациональным затратам на его подогрев. Решить эту проблему возможно с помощью электрических инфракрасных излучателей.

В Национальной академии наук Беларуси разработана автоматизированная система лучистого обеспечения технологических условий (АСЛОТУ), параметры которой определяются в соответствии с изложенным оптимизацион-

ным подходом к их расчету [4, 5]. Она состоит из электрических инфракрасных излучателей, блоков цифрового управления параметрами излучения и сети электроснабжения. В АСЛОТУ используются излучатели со специальным покрытием излучающих пластин, обеспечивающим узконаправленность лучистого потока в диапазоне длин волн, слабо поглощаемых воздухом и положительно воздействующих на технологические процессы. В блоки управления заносится программа, обеспечивающая работу системы: поддержание требуемых температурных условий, переход с одного температурного режима на другой в заданное время по энергосберегающему алгоритму, осуществление защиты оборудования при нарушениях параметров электросети и др.

В больших цехах доминирующий вклад в снижение энергозатрат на обогрев при использовании АСЛОТУ вносит его локализация – деление цеха на участки с автономным поддержанием индивидуальных температурных условий. Для повышения энергоэффективности системы нагревательные элементы излучателей (ТЭНы), расположенных на одном участке, соединяются в батареи. На каждую из них подается электрическая мощность, величина которой регулируется блоком управления и равномерно распределяется по объединенным ТЭНам.

Приведенные особенности АСЛОТУ обуславливают ее высокую эффективность, позволяя уменьшить расход первичного топлива на обогрев производственных цехов в 1,5...1,8 раза. Помимо этого она содействует решению технологических задач – созданию микроклимата, требуемого производственными процессами. В качестве примера приведем АСЛОТУ для полировального цеха БелОМО. В таблице даны основные характеристики цеха и инфракрасной системы, на фотографии – сам цех с установленными ИК-излучателями.

Эксплуатация системы показала, что за счет интенсификации термохимических реакций полировального процесса в результате воздействия инфракрасного излучения на 12 % увеличилась производительность обработки

Параметр	Ед-ца изм.	Значе- ние
Площадь цеха	м ²	1150
Высота цеха	м	4,2
Установленная мощность АСЛОТУ	кВт	160
Количество зон с индивидуальными температурными условиями	–	6
Снижение затрат условного топлива на обогрев за отопительный сезон	%	40



оптических изделий. Стабильность поддержания требуемых технологией тепловых условий, уменьшение подвижности воздуха и переноса пыли привели к снижению брака на 25 %.

Выводы

Предложен принцип оптимизации параметров инфракрасных систем обогрева производственных цехов, заключающийся в минимизации затрат на создание систем и их эксплуатацию при ограничениях, связанных с соблюдением санитарных и технологических норм, и с учетом законов теплопереноса и распространения инфракрасного излучения. В результате решения оптимизационной задачи определяются мощностные характеристики системы, расстановка излучателей и алгоритм их работы.

На основе электрических инфракрасных излучателей разработана автоматизированная система лучистого обеспечения технологических условий (АСЛОТУ). Ее применение позволяет снизить затраты первичного топлива на обогрев цехов в 1,5...1,8 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роди В. Модели турбулентности окружающей среды // В кн. Методы расчета турбулентных течений.– М.: Мир, 1984.– С. 227-322.
2. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем.– Л.: Химия, 1968.– 512 с.
3. Дмитриев Г.М. Ограничения параметров тепловой обстановки в рабочей зоне цеха при инфракрасном обогреве // Энергетика.– 2003.– № 2.– С. 84-92.
4. Ахрамович А.П., Дмитриев Г.М., Колос В.П., Михалевич А.А. Достоинства и потенциальные возможности систем ИК-обогрева // Энергоэффективность.– 2005.– № 7.– С. 10-12.
5. Ахрамович А.П., Дмитриев Г.М., Колос В.П., Михалевич А.А. Электрические ИК-излучатели средней удельной мощности // Энергоэффективность.– 2006.– № 12.– С. 16-19.

Получено 04.01.2012 г.