

Приборы и оборудование

УДК 536.532:536.629

Бесконтактное определение теплотерь от внешних поверхностей теплотехнического оборудования

Виноградов-Салтыков В.А.¹, Декуша О.Л.², Марценко В.П.³, Федоров В.Г.⁴, Кепко О.И.⁴.

¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

² *Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*

³ *Филиал Киевэнерго «Жилтеплоэнерго», Киев*

⁴ *Уманский национальный университет садоводства*

Установлена взаимосвязь, близкая к функциональной, между перепадом температур «поверхность – воздух» и тепловыми потерями, для различных типов теплотехнического оборудования и поверхностей ограждения (вертикальные, горизонтальные плоскости, вращающиеся цилиндрические поверхности). Использование наиболее адекватных уравнений для коэффициентов теплоотдачи дало возможности предложить методику бесконтактного определения теплотерь.

Ключевые слова: теплотехническое оборудование, печь обжига клинкера, наружные поверхности ограждений котла, пирометр, теплотери.

Встановлено взаємозв'язок, близький до функціонального, між перепадом температур «поверхня – повітря» і тепловими втратами, для різних типів та поверхонь огороження (вертикальні, горизонтальні площини, циліндричні поверхні, що обертаються). Використання найбільш адекватних рівнянь для коефіцієнтів тепловіддачі дало можливість запропонувати методику безконтактного визначення тепловтрат.

Ключові слова: теплотехнічне обладнання, піч обпалу клінкера, зовнішні поверхні огороження котла, пірометр, тепловтрати.

Потери теплоты от теплотехнического оборудования составляют значительную часть вырабатываемой или используемой этим оборудованием энергии, их снижение – это существенный ресурс энергосбережения. Обследование авторами печи обжига клинкера на заводе «Огнеупор» (г. Ватутино) показало, что по длине печи теплотери q растут от 2 до 12 кВт/м², а по длине охладителя уменьшаются от 10 до 4 кВт/м². При длине печи 75 м и диаметре $D = 3,65$ м общие потери от ограждения печи составляют около 6 МВт, а охладителя (длина 40 м, диаметр 2,54 м) они превышают 2 МВт.

Изучали распределение температур $t_{п}$ по поверхности оборудования бесконтактным способом с помощью пирометра Fluke-574. Излучающую способность обеих поверхностей принимали равной 0,95, как окисленной стали, покрытой пылью (рис.1).

Температуру окружающего воздуха $t_{в}$ измеряли палочным термометром и термопарой с защитой чувствительных элементов экранами от излучающих объектов. Плотность теплового потока от поверхности к окружающей среде q рассчитывали как сумму лучистой $q_{л}$ и конвективной $q_{к}$ составляющих. Для расчета коэффици-

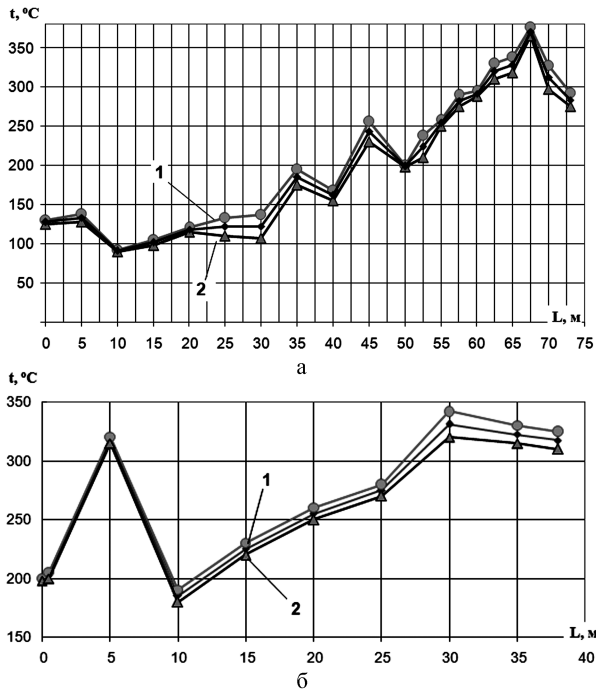


Рис.1. Распределение температур по поверхности печи обжига клинкера (а) и охладителя (б): 1 \dot{t}_{\max} , 2 \dot{t}_{\min} .

коэффициентов теплоотдачи $\dot{\alpha}$ суммарного α и конвективного α_K — из большого числа эмпирических формул выбрали более соответствующие физическим условиям отвода теплоты от нагретых горизонтальных труб большого диаметра [1, 2]:

$$q = \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}); \alpha = 9,54 + 0,85(t_{\text{п}} - t_{\text{в}})^{0,333}; \quad (1)$$

$$q = q_K + q_{\text{л}}; \quad (2)$$

$$q_K = \alpha_K (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}); \alpha_K = 9,5(t_{\text{п}} - t_{\text{в}})^{0,233}/D^{0,3}; \quad (3)$$

$$q_{\text{л}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{п}}^4 - T_{\text{в}}^4). \quad (4)$$

При вычислениях по формулам (1)–(4) в качестве $t_{\text{п}}$ ставили $0,5(t_{\text{max}} + t_{\text{min}})$. Результаты расчетов показали, что при $t_{\text{п}}$ до 140°C компоненты теплопотерь имеют одинаковый порядок, с повышением $t_{\text{п}}$ до 360°C лучистая составляющая превышает конвективную в 3 раза (рис.2).

Теплоэнергетические установки обычно имеют ограждения с лучшими изоляционными свойствами, чем теплотехнологическое оборудование, однако теплопотери и в этом случае можно и нужно уменьшать. Обследование авторами основных наружных поверхностей парового котла ТГМП-314А путем контактного измерения суммарной плотности теплового потока показало, что общие потери теплоты с этих поверхностей составляют 1,7 МВт при нагрузке котла 94 % от номинальной [3].

В работе использовали малогабаритные тепломеры. Степень черноты их наружных поверхностей подобрана такой же, как и поверхностей котла. Каждый тепломер снабжался дифференциальной мультитермопарой, горячие спаи которой закреплялись на поверхности тепломера, обращенной к испытываемой стенке, а холодные — за пределами пограничного слоя воздуха, но в зоне размещения тепломера. Количество спаев термопары подбиралось так, чтобы ее сигнал был того же порядка, что и тепломера, для регистрации их одним вторичным переносным прибором. Это дало возможность определить фактические значения суммарного коэффициента теплоотдачи, то есть взаимосвязь между плотностью теплопотерь q и перепадом температур $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}$.

Статистическая обработка данных дала одинаковые значения α в диапазоне перепадов температур $283\text{--}333^\circ\text{C}$, а именно $\alpha = 12,7 \pm 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Линейные зависимости q (Δt) получены и для остальных (вертикальных и верхней горизонтальной) поверхностей. Обработка всех опытных данных, за исключением нескольких участков, результаты измерения на которых не прошли проверки на F- и t-критерии, дала результат $\alpha = 12,0 \pm 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Такие обобщения дают основания к переходу на бесконтактное определение теплопотерь по формуле $q = \alpha \Delta t$. Однако достаточно близкое к функциональному соотношение q и Δt в

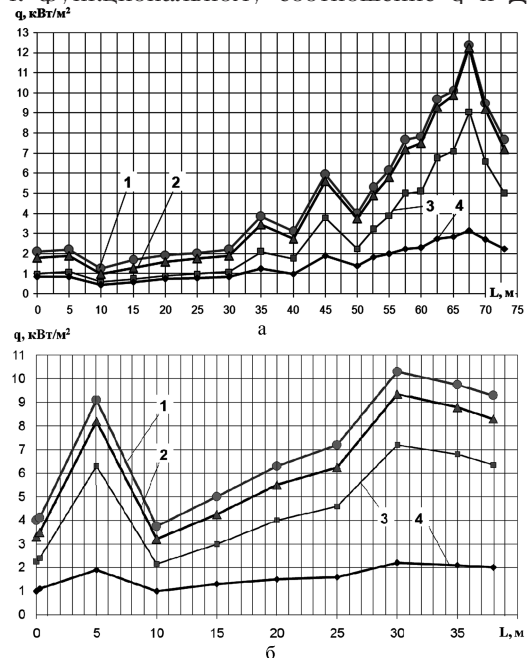


Рис.2. Расчетные значения плотности тепловых потоков от поверхности печи (а) и охладителя (б): 1 \dot{q} из уравнения (1); 2 \dot{q} из уравнений (2)–(4); 3 \dot{q} лучистая составляющая; 4 \dot{q} конвективная составляющая.

условиях производственной эксплуатации котла было получено при определении $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}$, когда $t_{\text{в}}$ определяли за пределами пограничного слоя, но вблизи от места расположения тепломера. Традиционно в инструкциях тепловых испытаний тепловых установок температуру воздуха в помещении рекомендуют измерять возле щита КИП или на расстоянии 150–300 мм от обследуемой стенки [4].

Для проверки этих рекомендаций были проведены опыты на ограждениях водогрейных котлов нескольких типов [5]. В одной серии опытов Δt измеряли по той же методике, что и на котле ТГМП, в другой – холодные спаи термодатчиков термостатировали при 0 °С, а $t_{\text{в}}$ определяли традиционно, по показаниям палочного термометра, закрепленного возле щита КИП. Для котлов разных типов (НИИСТУ, ТВГ, КВГ, ДКВР) результаты получились аналогичными: температура воздуха вдали от ограждений котлов не является достаточно репрезентативной в качестве $t_{\text{в}}$ для определения коэффициента теплоотдачи из тождества $\alpha \cdot q / (t_{\text{п}} - t_{\text{в}})$. Разброс опытных данных в системе $\Delta t - q$ оказался довольно большим, например, при $\Delta t = 303$ °С доверенная плотность теплового потока могла меняться от 0,30 до 0,38 кВт/м². Возможно, для каждого типа котельных найдется более представительная точка для измерения температуры воздуха.

Необходимо отметить еще одно затруднение на пути использования имеющихся уравнений подобия и эмпирических формул определения коэффициентов теплоотдачи для перехода к бесконтактному измерению теплопотерь. Это большая неравномерность полей температур и тепловых потоков по поверхности ограждений.

На рис.3 приведены гистограммы распределения теплопотерь для паровых и водогрейных котлов разных типов. По горизонтали отложены интервалы плотности теплопотерь, измеренной на отдельных участках поверхности (100–200, 201–300 Вт/м²), а по вертикали – количество участков N, попавших в данный интервал.

Все измерения проводили контактным способом. Для водогрейных котлов, учитывая опыт обмера q на котле ТГМП-314А, увеличили количество элементарных участков на поверхностях ограждений котлов [6]. Все котлы (НИИСТУ-5; НИИСТУ-5-спарка; ТВГ-4; ТВГ-8; ДКВр-10м в водогрейном режиме) были в разной фазе эксплуатации, поэтому к неравномерным теплопотерям, присущим конструкции котла, добавились места частично выгоревшей обмуровки и т.п.

Наиболее равномерными выявились поля теплопотерь от ограждений котлов ТВГ-4 и

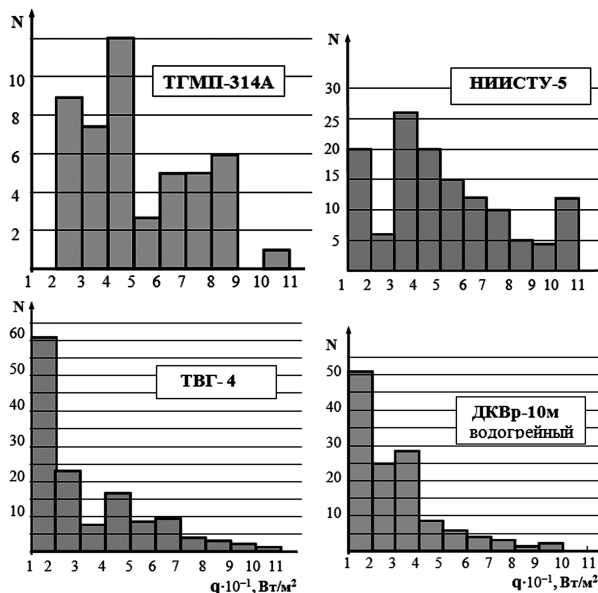


Рис.3. Гистограммы неравномерности теплопотерь от котлов ТГМП-314А (а); НИИСТУ-5 (б); ТВГ-4 (в); ДКВр-10м водогрейный (г).

ТВГ-8 разработки Института газа НАНУ: гистограммы для них напоминают экспоненты с большим значением параметра распределения. Это свидетельствует о том, что ограждения спроектированы правильно (потери тепла в окружающую среду q_5 в тепловом балансе этих агрегатов являются наименьшими среди водогрейных котлов). Поэтому для дальнейшей работы по выяснению возможностей бесконтактного определения теплопотерь измерения проводили на котле ТВГ-8.

Средства теплотрии позволили уточнить фактические значения степени черноты наружных поверхностей ограждений котла и трубопроводов ϵ , необходимые для корректного измерения температур этих поверхностей с помощью радиометров, пирометров или тепловизоров. Использовали непрозрачную пленку оракал. Ее степень черноты определили на градуировочном теплотрическом стенде [7] как отношение электрических сигналов контрольного тепломера $E_{\text{т}}$ с известной степенью черноты $\epsilon_{\text{т}}$ и того же тепломера, облучаемого тем же лучистым потоком, но с приемной поверхностью, на которую наклеен оракал, $E_{\text{оп}}$:

$$\epsilon_{\text{оп}} = \epsilon_{\text{т}} E_{\text{оп}} / E_{\text{т}} \quad (5)$$

Статистически обоснованной величиной выявлена $\epsilon_{\text{оп}} = 0,94$. Далее оракал наклеивали на часть испытуемого участка ограждения с одинаковой температурой поверхности. После измерения пирометром Fluke температуры поверх-

ности, покрытой $T_{ор}$ и не покрытой $T_{пов}$ пленкой, определяли степень черноты испытываемой поверхности $\epsilon_{пов}$:

$$\epsilon_{пов} = 0,94 T_{п} / T_{ор} \quad (6)$$

Результаты измерения $\epsilon_{пов}$ приведены ниже:

Красный кирпич гладкий	–	0,92
то же шероховатый	–	0,94
Побелка	–	0,93
Цементная штукатурка	–	0,95
Трубопровод, краска серая	–	0,93
То же желтая	–	0,96
То же зеленая	–	0,94
То же кузбаслак черный	–	0,91

Серия опытов по измерению суммарной плотности теплового потока q и перепада температур Δt подтвердила, что линейная зависимость q (Δt) для вертикальных поверхностей данного котла описывает связь между этими величинами не хуже, чем многочисленные эмпирические зависимости для конвективной и лучистой составляющих плотности теплового потока.

Выводы

Предложена методика бесконтактного определения тепловых потерь в окружающую среду от теплотехнического оборудования, основанная на использовании результатов измерения температур поверхностей оборудования радиометрическими средствами и корреляции между плотностью тепловых потоков и перепадом температур. По точности и оперативности измерения

эта методика не уступает существующим способам определения теплопотерь.

Список литературы

1. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : Справ. — М. : Атомиздат, 1979. — 214 с.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : Учеб. для вузов. — М. : Высш. шк., 1982. — 415 с.
3. Федоров В.Г., Виноградов-Салтыков В.А., Новик М.И. Теплометрия наружных поверхностей котла ТГМП-314А // Экологические технологии и ресурсосбережение. — 1999. — № 4. — С. 77–79.
4. ДСТУ 4035-2001. Энергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та доквіллам / Розроб. Т.Г.Грищенко, Л.В.Декуша, Т.В.Менделеева та ін. — Київ : Держстандарт України, 2001. — 43 с.
5. Виноградов-Салтыков В.А., Марченко В.П., Федоров В.Г. Корреляция температурных перепадов и теплопотерь от ограждений водогрейных котлов // Пром. теплотехника. — 2005. — Т. 27, № 5. — С. 76–78.
6. Виноградов-Салтыков В.А., Марченко В.П., Федоров В.Г. Неравномерность теплопотерь через ограждения водогрейных котлов // Новости теплоснабжения. — 2005. — № 2. — С. 23–24.
7. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Зайцев В.Б. Установка для радиационной градуировки преобразователей теплового потока // Пром. теплотехника. — 2003. — Прилож. к № 4. — С. 462–464.

Поступила в редакцию 21.03.10

Heat Loss from Exterior Surfaces of Heat Engineering Equipment Contactless Determination

*Vinogradov-Saltykov V.A.¹, Dekusha O.L.²,
Martsenko V.P.³, Fedorov V.G.⁴, Kepko O.I.⁴*

¹ National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

² Institute of Engineering Thermophysics of NASU, Kiev

³ Kiev Enterprise «Kievenergo»

⁴Umansky National University of Gardening

The interrelation closed to functional between surface — air temperature drop and heat loss for different types of heat engineering equipment and fences surfaces such as vertical and horizontal planes, rotating cylindrical surfaces is established. The application of the most sufficient equations for heat transfer coefficients allows to propose heating loss contactless determination.

Key words: heat engineering equipment, clinker fallen furnace, boiler protection external surfaces, pyrometer, heat loss

Received March 21, 2010