

## ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ БЕСКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

А.А. Долинский, Л.В.Декуша, Л.И.Воробьев, Т.Г.Грищенко, В.А.Виноградов–Салтыков

Наиболее распространенными в Украине являются объекты малой энергетики, которые, несмотря на свое название, используют почти 60% топлива, потребляемого всем энергетическим комплексом Украины. Это – районные отопительные котельные, заводские теплоэлектроцентрали, промышленные печи, котельные установки, предназначенные для обслуживания отдельных коттеджей или нескольких сооружений и зданий.

Почти во всех регионах Украины эксплуатируемые более 20 ÷ 25 лет котлы малой и средней мощности имеют значительный физический износ, теплоизоляция большинства котлоагрегатов, трубопроводов и запорной аппаратуры имеет серьезные повреждения, что приводит к существенным тепловым потерям. Например, теплотери от внешнего охлаждения котла составляют от 0,1 % до 5 % теплового баланса и практически никак не контролируются, а рассчитываются как остаток от определения статей баланса. На трубопроводах сети теплоснабжения теплотери колеблются от 5 % до 25 %, а в магистралях с малым диаметром трубопроводов могут достигать 30 %.

Диагностика действительного состояния теплоизоляционных и ограждающих конструкций котлов, котельного оборудования, трубопроводов и установление ресурса их дальнейшей эксплуатации невозможны без наличия информации про уровень поверхностных температур и тепловых потоков от объекта в окружающую среду.

Измерительный комплекс "Ресурс" и методика прямых контактных измерений, разработанные в ИТТФ [1], обеспечивают возможность определения тепловых потерь от энергетического и технологического оборудования, зданий и сооружений, а также теплофизических характеристик теплоизоляционных и строительных материалов. Комплекс, внешний вид которого показан на рис. 1, состоит из измерительного блока и персонального переносного компьютера (ноутбука) с соответствующим программным обеспечением, а также набора первичных преобразователей и теплофизических измерительных устройств. Для решения многочисленных задач контроля и диагностики теплового состояния объектов, поверхности которых доступны оператору для размещения на них контактных средств измерения поверхностных температур и тепловых потоков, комплекс "Ресурс" оснащен преобразователями теплового потока (далее – ПТП) [2, 3], температуры (термопарами) и различными теплофизическими измерительными устройствами.

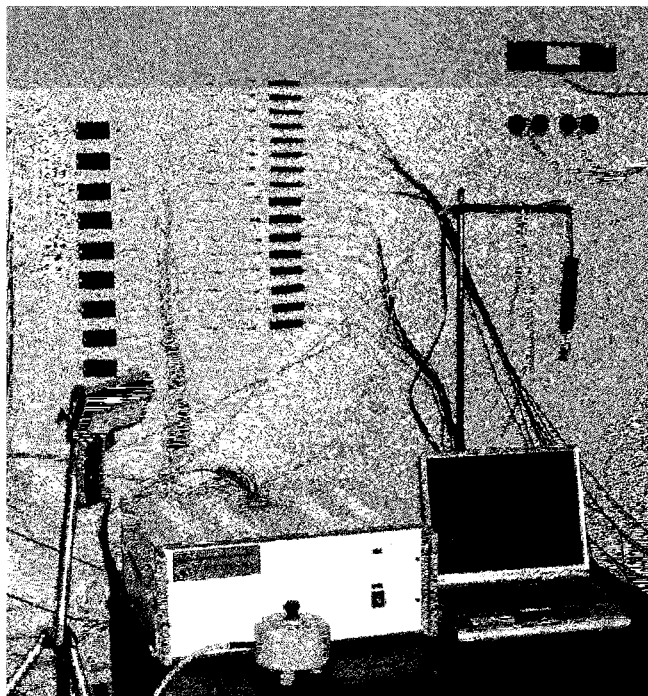


Рисунок 1 – Внешний вид измерительного комплекса "Ресурс"

Первичные преобразователи устанавливают на поверхности обследуемых объектов и определяют локальные тепловые потоки и температурное поле исследуемой поверхности. По результатам измерений определяют тепловые потоки и температуры в характерных зонах поверхности, а также выявляют аномальные зоны, в которых обнаружены значения температуры и теплового потока, существенно отличающиеся от среднего. С учетом площадей характерных и аномальных зон рассчитывают полные теплотери с поверхности объекта.

Измерительный комплекс "Ресурс", оснащенный контактными первичными измерительными преобразователями, обеспечивает возможность определения тепловых потерь от энергетического и технологического оборудования, зданий и сооружений. Однако, при обследовании крупногабаритных объектов, которые имеют большие теплоотдающие поверхности и пространственно неоднородные тепловые поля, метод контактных измерений становится практически трудно осуществимым. Он сопровождается не только значительными временными затратами, но и большими трудностями при установке преобразователей по поверхностям объекта.

Существенно повысить продуктивность труда и сократить время обследования теплового состояния таких объектов позволяет бесконтактный метод измерений температуры с применением пирометров или тепловизоров.

В последние годы благодаря расширению внедрения бесконтактных средств измерения температуры и снижению цен на них стало доступным применение пирометров и тепловизоров с высокой разрешающей способностью для измерения и контроля температурных полей энергетических объектов, а также приемников теплового излучения для определения плотности потока падающего теплового излучения.

На основании измерений температуры поверхности объекта и окружающей среды могут быть рассчитаны значения поверхностной плотности теплового потока. Суммарный тепловой поток с поверхности ограждающей конструкции (ОК) может быть получен по расчетной формуле:

$$q_{\Sigma,OK} = \alpha \cdot (T_{OK} - T_{OC}) + \sigma \varepsilon \cdot T_{OK}^4 - a_{OK} \cdot q_{ПАД} \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части формулы (1) соответствует конвективной составляющей теплообмена, а второе и третье слагаемые - радиационные составляющие, соответственно, потоки собственного и падающего (пришедшего из окружающего пространства) теплового излучения.

Для расчета по формуле (1) значения температуры в различных точках поверхности ОК могут быть измерены бесконтактным способом с помощью пирометра или тепловизора. Измерение температуры окружающей среды (воздуха) также обычно не представляет значительных трудностей – пирометры и тепловизоры, как правило, обладают встроенными средствами измерения температуры воздуха, а при необходимости можно использовать и другие известные приборы, важно лишь следить, чтобы на их показания не влияли внешние источники теплового излучения.

Значения полусферических терморadiационных характеристик – коэффициента поглощения  $a_{OK}$  и степени черноты  $\varepsilon$  зависят от вида и состояния поверхности ОК и могут быть определены по справочным данным, имеющимся в литературе [4].

Основные трудности при расчете значений поверхностной плотности теплового потока по формуле (1) представляет определение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  и значения плотности радиационного теплового потока  $q_{ПАД}$ , падающего на исследуемую ОК от окружающих объектов. Значения этих величин могут быть получены как расчетными (косвенными) методами, так и прямыми измерениями с помощью рассмотренных ниже приборов.

Расчетный метод определения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  основан на использовании известных полуэмпирических зависимостей, полученных при исследовании свободной конвекции для поверхностей разных размеров, геометрии и расположения в пространстве. Метод позволяет достаточно легко рассчитать с погрешностью 10% ÷ 20% коэффициент конвективного теплообмена и с использованием результатов температурных измерений найти конвективную составляющую плотности суммарного теплового потока. При этом для определения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  можно воспользоваться критериальным соотношением [5]:

$$Nu = C \cdot K \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

где  $Nu = \alpha \cdot X / \lambda$  – число Нуссельта (безразмерный коэффициент конвективного теплообмена);

$C, K, n$  – соответственно, безразмерная константа, корректирующая функция и показатель степени, для которых в таблице 1 [5] даны их значения для различных систем (пластина, цилиндр, сфера, расположенные горизонтально, вертикально или под определенным углом наклона относительно вертикали) и режимов (турбулентный, ламинарный);

$Gr \cdot Pr$  – безразмерный комплекс, характеризующий термогравитационную составляющую конвективного теплообмена [5, 6] и вычисляемый по формуле:

$$Gr \cdot Pr = g \cdot \beta \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot X^3 \cdot \Delta T / (\mu \lambda), \quad (3)$$

при этом надо учитывать, что ламинарная конвекция имеет место при характерных значениях комплекса  $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$ ; турбулентная конвекция начинается при  $Gr \cdot Pr > 10^9$ , а при значениях  $Gr \cdot Pr < 10^3$  влиянием конвективной составляющей можно пренебречь.

Таблица 1 – Значения параметров  $C, n$  та  $K$  в соотношениях (2) и (3) для вычисления коэффициента конвективного теплообмена в различных случаях естественной конвекции [5].

Система	$C$	$n$	$K$	Режим течения потока	№ формулы
Горизонтально расположенный цилиндр	0,47	0,25	1	Ламинарный поток	(4)
	0,1	0,33	1	Турбулентный поток	(5)
Вертикальная пластина и вертикально расположенный цилиндр большого диаметра $D / L \geq 38 \cdot Gr^{-1/4}$	0,8	0,25	$\left[ 1 + \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{Pr}} \right)^2 \right]^{-1/4}$	Ламинарный поток Среднее значение	(6)
	0,6	” ”	” ”	Для локального значения Nu: $X=x$ (текущая координата)	(7)
	0,0246	0,4	$\left[ \frac{Pr^{1/6}}{1 + 0,494 \cdot Pr^{2/3}} \right]^{2/5}$	Турбулентный поток Среднее значение	(8)
	0,0296	” ”	” ”	Для локального значения Nu: $X=x$	(9)
Вертикально расположенный цилиндр малого диаметра	0,686	0,25	$\left[ \frac{Pr}{1 + 1,05 \cdot Pr} \right]^{1/4}$	Ламинарный поток	(10)
Нагреваемая горизонтальная пластина, теплоотдающая поверхность сверху	0,54	0,25	1	Ламинарный поток (для круглого диска диаметром $D$ используется $X = 0,9 \cdot D$ )	(11)
	0,14	0,33	1	Турбулентный поток	(12)
Нагреваемая горизонтальная пластина, теплоотдающая поверхность снизу	0,27	0,25	1	Только ламинарный поток	(13)

Слегка наклоненная пластина ( $\phi$ - угол между вертикалью и плоскостью пластины)	0,8	0,25	$\left[ \frac{\cos \phi}{1 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\text{Pr}}}\right)^2} \right]^{\frac{1}{4}}$	Ламинарный поток (Gr умноженный на $\cos \phi$ в формуле (6) для вертикальной пластины)	(14)
Сфера	0,49	0,25	1	Ламинарный поток	(15)

Кроме указанных соотношений (2...15) для случая естественной конвекции в [5...7] рекомендованы соотношения для вычислений коэффициента конвективного теплообмена в случае вынужденного движения воздуха. Хотя, как правило, приводимые в литературе расчетные формулы, предназначены для расчета коэффициента теплообмена на изотермических поверхностях, в первом приближении их можно использовать и в случаях теплообмена неравномерно нагретых поверхностей энергетического оборудования.

Много сложнее определить радиационную составляющую теплообмена ОК с ОС, при наличии рядом с ОК объектов, температура поверхности которых отличается от температуры ОК, таких как работающее энергетическое оборудование, радиаторы, мощные светильники и др., которые являются дополнительными источниками теплового излучения (ИТИ).

Уравнение теплового баланса для определения плотности суммарного теплового потока через поверхность контролируемого объекта ( $q_{\Sigma, ОК}$ ) при наличии окружающих его излучающих поверхностей других ИТИ имеет следующий вид [6]:

$$q_{\Sigma, ОК} = \alpha \cdot (T_{ОК} - T_{ОС}) + a_{ОК} \cdot \sigma \cdot \sum_{k=1}^n a_k \cdot (T_{ОК}^4 - T_k^4) \cdot \Phi_{ОК-k} \quad (16)$$

где  $\Phi_{ОК-k}$  – разрешающий угловой коэффициент излучения между ОК контролируемого объекта и  $k$ -ым дополнительным ИТИ.

Разрешающие угловые коэффициенты излучения для поверхностей, между которыми происходит радиационный теплообмен, определяются из решения системы алгебраических уравнений следующего вида:

$$\Phi_{i-k} = \varphi_{i-k} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j \cdot \varphi_{i-j} \cdot \Phi_{j-k}, \quad i, k = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

где  $\varphi_{i-k}$  – угловой коэффициент излучения между поверхностями  $i$ -того и  $k$ -ого ИТИ,

$\varphi_{j-k}$  – то же между поверхностями  $j$ -ого  $k$ -ого ИТИ,

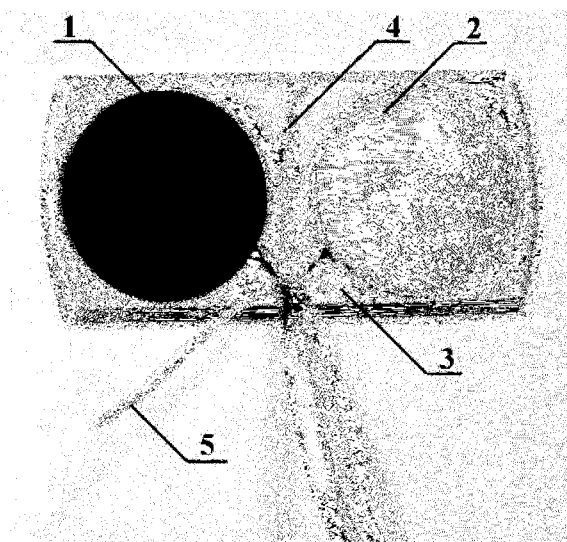
$r_j$  – отражательная способность поверхности  $j$ -ого ИТИ,

$\Phi_{j-k}$  – разрешающий угловой коэффициент излучения между поверхностями  $j$ -ого и  $k$ -ого ИТИ.

Угловые коэффициенты излучения  $\varphi_{i-k}$  между двумя поверхностями зависят от взаимного расположения поверхностей, геометрических размеров тел и могут быть рассчитаны по известным формулам [4...6].

Таким образом, для определения радиационной составляющей плотности теплового потока по результатам температурных измерений необходимо выполнить большой объем измерений не только значений температур ОС и всех участвующих в теплообмене поверхностей, но и геометрических размеров всех окружающих поверхностей с учетом их расположения относительно ОК и друг друга для вычислений угловых коэффициентов излучения. Такой подход к определению теплопотерь возможен, но имеет очень ограниченное применение ввиду большого объема экспериментальных работ и неопределенностей в информации о терморadiационных характеристиках поверхностей.

Для определения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  и значения плотности радиационного теплового потока  $q_{пад}$ , падающего на исследуемую ОК от окружающих объектов, разработано и введено в состав комплекса "Ресурс" специальное малогабаритное теплотметрическое устройство модели РКТП-2, внешний вид которого показан на рис. 2.



1 – ПТП с “черной” тепловоспринимающей пластинкой; 2 – ПТП с “белой” тепловоспринимающей пластинкой; 3 – подложка температуровыравнивающая; 4 – термопара для измерения температуры поверхности ОК; 5 – термопара для измерения температуры воздуха

Рисунок 2 – Внешний вид теплотметрического устройства РКТП-2

Устройство с габаритными размерами 40×100×4 мм представляет собой неразъемную плоскую конструкцию, которая содержит два ПТП, 1 и 2, одинаковых размеров (Ø40×2мм), смонтированных на общей температуровыравнивающей подложке 3, которая обеспечивает изотермические условия для контактирующих с ней поверхностей ПТП. Другие плоские поверхности обоих ПТП снабжены пластинками, которые обеспечивают неодинаковые (контрастные) степени черноты тепловоспринимающих поверхностей ПТП. Диапазон значений

интегральной полусферической излучательной (поглощательной) способностей этих поверхностей составляют, соответственно:

– от 0,85 до 0,90 для "черного" ПТП,

– от 0,02 до 0,25 для "белого" ПТП.

Устройство также снабжено термопарами для измерения температуры тепловоспринимающей пластины ( $T_{пл}$ ) и воздуха ( $T_{oc}$ ).

Значения температур поверхностей "черного" и "белого" ПТП  $T_1$  и  $T_2$ , вычисляются по формуле:

$$T_i = T_{пл} + R_{T,i} \cdot q_{изм,i}, \quad i=1; 2,$$

где  $R_{T,i}$  – тепловое сопротивление  $i$ -ого ПТП.

$q_{изм,i}$  – плотности теплового потока, измеряемые каждым ПТП и вычисляемые по формуле:

$$q_{изм,i} = k_i E_i, \quad i=1; 2, \quad (18)$$

где  $k_i$  и  $E_i$  – коэффициент преобразования и термоэлектрический сигнал  $i$ -ого ПТП.

Так как измеренные каждым ПТП плотности теплового потока  $q_{изм,i} (i=1, 2)$  соответствуют плотности суммарного теплового потока через их поверхности, то уравнения теплового баланса для каждого  $i$ -ого ПТП по аналогии с (1) имеют вид:

$$q_{изм,1} = q_{\Sigma,1} = \alpha(T_1 - T_{oc}) + \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4 - a_1 q_{пад}, \quad (19)$$

$$q_{изм,2} = q_{\Sigma,2} = \alpha(T_2 - T_{oc}) + \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot T_2^4 - a_2 q_{пад}. \quad (20)$$

Совместное решение уравнений (19) и (20) дает расчетные формулы для вычисления поверхностной плотности потока падающего теплового излучения и коэффициента конвективного теплообмена:

$$q_{пад} = \left( \sigma \varepsilon_1 T_1^4 - q_{изм,1} + (q_{изм,2} - \sigma \varepsilon_2 T_2^4) \cdot \frac{T_1 - T_{oc}}{T_2 - T_{oc}} \right) \cdot \left( a_1 - a_2 \cdot \frac{T_1 - T_{oc}}{T_2 - T_{oc}} \right)^{-1}, \quad (21)$$

$$\alpha = (q_{изм,i} + a_i q_{пад} - \sigma \varepsilon_i T_i^4) / (T_i - T_{oc}), \quad i = 1 \text{ или } 2. \quad (22)$$

Поскольку устройство оснащено термопарами с нормированными характеристиками, то значения температуры рассчитывают по известным аппроксимационным формулам.

Определение терморрадиационных характеристик покрытий обоих ПТП выполняется предварительно на специализированной установке ИТРС-1 [8, 9].

Устройство РКТП можно применять со стандартным измерителем электрического напряжения, но наиболее эффективно – в составе комплекса "Ресурс".

Получив информацию от обоих ПТП устройства РКТП и измерив температуры  $T_{OK}$  и  $T_{OC}$ , по соответствующей программе можно рассчитать значения  $q_{ПАД}$  и  $\alpha$  по формулам (21) и (22), а затем найти поверхностную плотность суммарного теплового потока через поверхность ОК по формуле (1).

Таким образом, устройство РКТП позволяет проводить прямые измерения значений  $q_{ПАД}$  и  $\alpha$ , однако измерения проводятся локально, что является недостатком этой методики. Перемещение устройства РКТП в другую точку поверхности объекта требует затрат времени на перемонтаж и стабилизацию теплового режима ОК и самого РКТП. Значительно более производительны измерения плотности потока падающего теплового излучения с помощью разработанного в ИТТФ радиометра РАП-12Д [10, 11], (см. рис. 3). Прибор является абсолютным полостным приемником полусферического теплового излучения и построен по дифференциальной схеме на базе термоэлектрических ПТП.

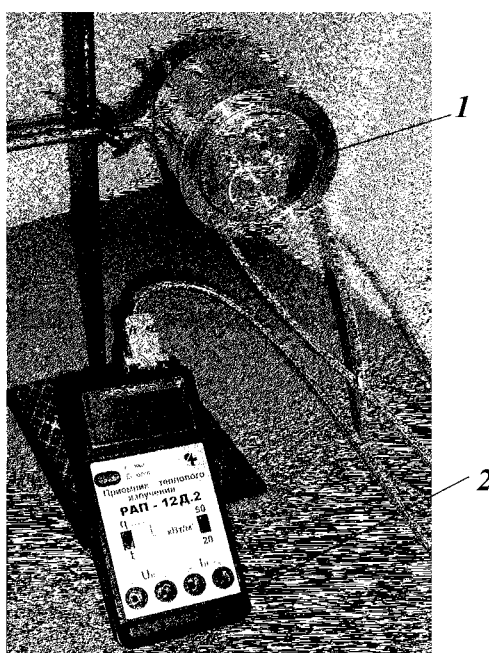


Рисунок 3 – Внешний вид приемника теплового излучения РАП-12Д

1 – приемное устройство; 2 – цифровое показывающее устройство

По результатам измерения определяется плотность потока падающего теплового излучения по формуле:

$$q_{ПАД} = (q_{ИЗМ} + q_{СОБ.РАД}) / a_{РАД} = \frac{\bar{E}_{РАД} \cdot K_{РАД}}{a_{РАД}} + \sigma \cdot T_{РАД}^4, \quad (23)$$

где  $q_{ИЗМ} = K_{РАД} \cdot \bar{E}_{РАД}$  – измеренная радиометром плотность теплового потока;

где  $K_{РАД}$  и  $\bar{E}_{РАД}$  – градуировочный коэффициент и среднее арифметическое значение сигналов радиометра РАП-12Д, измеренных в установившемся тепловом режиме,  $T_{РАД}$  – собственная



термодинамическая температура радиометра. Исходя их соотношения геометрических размеров тепловоспринимающей полости приемника  $a_{РАД} = \varepsilon_{РАД}$ .

Как видно из приведенной выше информации, каждый из приборов, методов измерений и расчетов обладает как преимуществами, так и недостатками. В связи с этим разработана методика обследования теплового состояния различных энергетических объектов, в которой объединены преимущества бесконтактного и контактного способов измерений и сочетаются прямые измерения и расчетные методы определения коэффициента теплообмена. Методика ориентирована на применение измерительного комплекса «Ресурс», в состав которого кроме первичных преобразователей температуры и теплового потока для контактных измерений введены устройство РКТП, пирометр «Fluke-574» и радиометр РАП-12Д. Методика заключается в выполнении следующих экспериментальных и вычислительных операций:

- предварительная разбивка контролируемой поверхности обследуемого объекта на предположительно однородные и одинаковые по площади измерительные зоны;
- проведение сканирования поверхности измерительных зон с помощью пирометра «Fluke-574», подключенного к ноутбуку, и построение поля поверхностных температур по соответствующей компьютерной программе;
- выявление в полученном температурном поле характерных зон, в которых получено наибольшее количество одинаковых значений температуры.

Далее, в случае доступности оператору измерительных зон:

- разместить на поверхности каждой характерной зоны по два ПТП со встроенной термопарой, имеющие контрастные по степени черноты наружные поверхности, или устройство РКТП и записать показания "белого" и "черного" ПТП и термопар и вычислить значение  $q_{\Sigma,OK}$  по формуле (1) с учетом формул (21) и (22).

Для случаев с труднодоступными поверхностями:

- произвести повторную разбивку поверхности на уточненные измерительные зоны с выделением не только характерных, но и аномальных зон, для которых получены максимальные и минимальные значения температур;
- выполнить в уточненных зонах бесконтактное измерение температуры с помощью пирометра и определение плотности потока падающего теплового излучения с помощью радиометра РАП-12Д, а также температуры воздуха в пристенном слое с применением любого измерителя температуры, снабженного экраном чувствительного элемента от воздействия посторонних ИТИ;
- выбрать расчетную формулу для вычисления коэффициента  $\alpha$  исходя из вида, размеров и пространственного расположения поверхности ОК, условий теплообмена ее с окружающей средой и наличия вынужденного движения воздуха возле исследуемой поверхности ОК;

– рассчитать плотность суммарного теплового потока по формуле (1) с учетом формул (23) или (21) и вычислить среднее арифметическое по всей поверхности ОК:

$$\bar{q}_\Sigma = \left( \sum_{n=1}^N q_{\Sigma,n} \cdot S_n \right) / \sum_{n=1}^N S_n ; \quad (24)$$

– уточнить значение  $\bar{q}_\Sigma$  с учетом существенных отличий в аномальных измерительных зонах;

– сравнить уточненное значение  $\bar{q}_\Sigma$  с нормативными значениями тепловых потерь для данного типа энергетического объекта.

Экспериментальная апробация этой методики проведена на теплоэнергетическом объекте коммунального хозяйства филиала "Киевэнерго" "Жилтеплоэнерго" – теплофикационном водогрейном газовом котле ТВГ-8. Во время обследования котел был уже выведен на 80-процентный режим нагрузки, имел коэффициент полезного действия 92,4 % и отработал в таком режиме уже больше двух часов. Для измерений выбрана правая боковая поверхность котла, на которую не влияла работа другого теплоэнергетического оборудования. Возле стены зафиксирован слабый поток воздуха со скоростью до 0,5 м/с.

Исследование выполнено с целью сопоставления результатов измерений, полученных бесконтактным и контактными способами. При этом для бесконтактного измерения температуры применен пирометр "Fluke-574" и для контактного – термопары, встроенные в ПТП. Последние также были применены для контактных измерений плотности результирующего теплового потока. Определение плотности потока падающего теплового излучения бесконтактным способом выполнено при помощи радиометра РАП-12Д. Результаты этого обследования представлены на рис. 4.

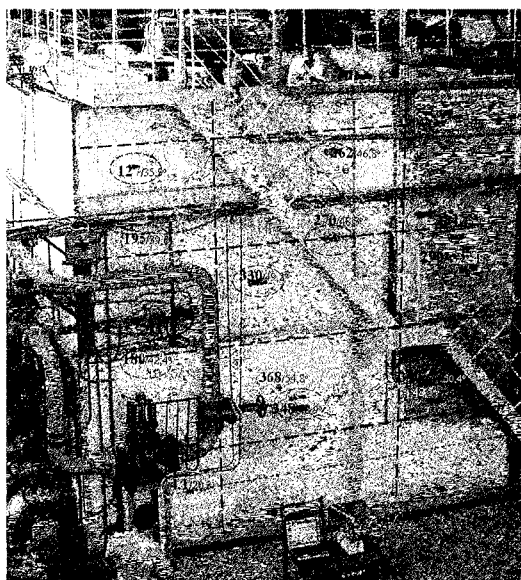


Рисунок 4 – Распределение тепловых потоков и температур по правой боковой поверхности водогрейного котла ТВГ-8

Поверхность стенки разделена на оптимальное количество зон, одинаковых по площади, кроме нижней части (высотой 70 см), которая была определена как зона с почти нулевыми теплопотерями. В каждой зоне первое выделенное число – значение плотности результирующего теплового потока, через дробную черту – значение температуры поверхности, которое измерено термопарой, то есть контактным способом, а светлым тоном записано значение температуры, полученное с помощью пирометра. Как видно из рисунка, полученные различными способами значения поверхностной температуры в одних и тех же точках совпадают в пределах погрешности измерений. То же касается и измеренных значений плотности теплового потока.

Полученные результаты обследования теплового состояния правой боковой поверхности котла ТВГ-8 проанализированы с позиции их зависимости от разности температур поверхности и воздуха и приведены на рис. 5 в виде экспериментальных точек и графиков расчетных зависимостей  $q = f(\Delta T)$ .

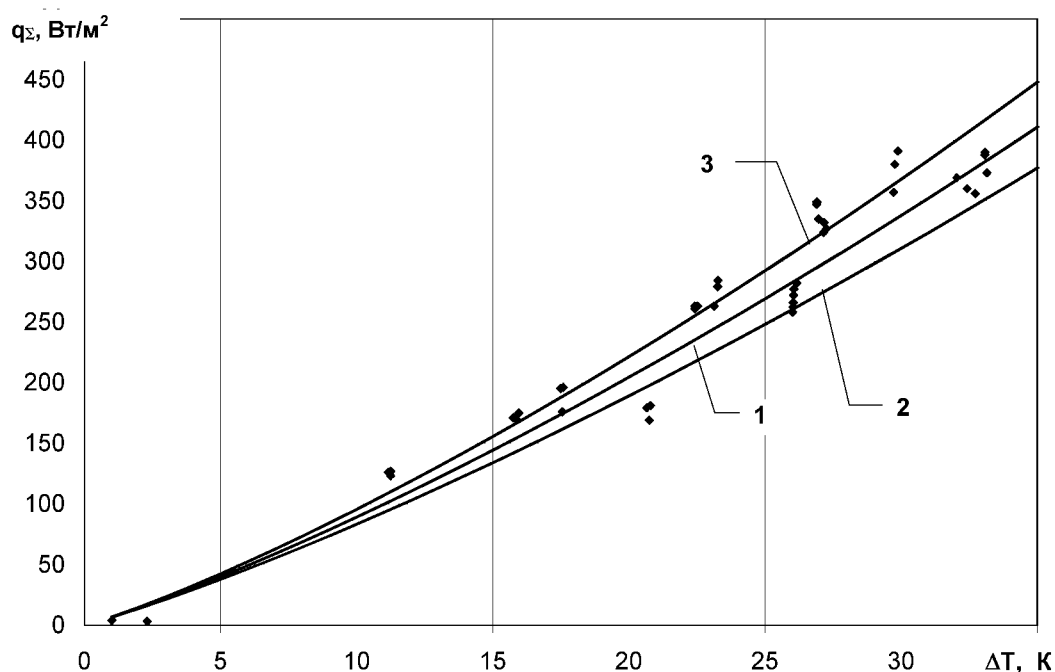


Рисунок 5 – Зависимость плотности суммарного теплового потока от разности температур поверхности котла и окружающего воздуха

- ◆ – экспериментальные точки, полученные при контактных измерениях
- 1...3 – расчетные кривые.

Кривая 1 получена на основании уравнения (1) и среднего значения коэффициента  $\alpha$ , вычисленного по формулам (2) и (8). Кривые 2 и 3 получены на основании уравнения (1) и локальных значений коэффициента  $\alpha$ , вычисленных по формулам (2) и (9) для высот, соответствующих нижней (высота 0,7м) и верхней (высота 4,8м) точкам установки ПТП. Хотя наблюдается довольно большой разброс экспериментальных данных, но как видно на рис.5,

большинство из экспериментально полученных точек лежит вдоль расчетных кривых. Среднеинтегральная плотность теплового потока по результатам контактных измерений с помощью ПТП составила 252 Вт/м<sup>2</sup>, а по результатам бесконтактных измерений температуры и расчетов с использованием формул (2) и (8) - 238 Вт/м<sup>2</sup>. То есть, расхождение результатов контактных и бесконтактных измерений не превышает 6%.

Из приведенных данных следует, что значения теплового потока, полученные контактным способом и рассчитанные по результатам бесконтактных измерений, соответствуют друг другу в пределах погрешностей измерения и расчета коэффициента теплообмена.

Таким образом, методика обследования теплового состояния энергетических объектов, основанная на бесконтактных измерениях температуры, применении специализированных приборов измерения падающего теплового потока и коэффициента теплообмена позволяет корректно получать значения теплового потока через ОК исследуемых объектов. Результаты обследования позволяют объективно оценить тепловое состояние энергетического объекта, например, обмуровки котла и тепловой изоляции котельного и другого теплоэнергетического оборудования с указанием критических зон, в которых возможны повреждения элементов конструкции, приводящие к неоправданным потерям теплоты.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 *Долінський А.А., Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробйов Л.Й. та інші.* Вимірювально-діагностичний комплекс "Ресурс" для типових обстежень котлів, котельного обладнання та трубопроводів// Сб. "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин". – Київ: Видавництво ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 2006. – С. 255-260.
- 2 *Грищенко О.А.* Основы теплотехники. – Киев: Наук. думка, 1971. – 192 с.
- 3 ГОСТ 30619-98 (ДСТУ 3756-98) Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия. Киев: Госстандарт Украины, 2000. - 21 с.
- 4 Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції: Методика М00013184.5.023-01/Розробники: Т.Г.Грищенко, Л.В.Декуша та інші.–К.:ЛОГОС, 2002.–131 с.
- 5 *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров/Справочник. – Пер. с англ.– М.: Атомиздат, 1979. – 214 с.
- 6 *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление//Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
- 7 *Богословский В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха)//Учебник для вузов.– М.: Высш.школа, 1982. –415 с.
- 8 *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Гайдучек А.В.* Калориметрический метод и устройство для определения терморрадиационных характеристик энергосберегающих материалов и покрытий//Пром. теплотехника, 2002. – Т.24., № 2-3. – С.159-164.
- 9 *Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И. и др.* Установка для прямого измерения интегральных полусферических терморрадиационных характеристик энергоэффективных стекол и покрытий ИТРС-1//Оконные технологии, 2006. – № 24. – С. 36-39.
- 10 *Бутенко А.И.* Приемники теплового излучения моделей РАП-12М и РАП-12М.2//Пром.теплотехника. – 2004. –Т.26, № 6.– С. 209-212.
- 11 *Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И., Декуша Л.В. и др.* Полостные приемники теплового излучения//Матеріали V Міжн. науково-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка. Метрологія 2006, Т.2», Харків, 2006.– С. 38–40.

Обозначения, сокращения и индексы к статье «Оперативное определение тепловых потерь объектов энергетики бесконтактным способом»

авторов А.А. Долинского, Л.В.Декуши, Л.И.Воробьева, Т.Г.Грищенко, В.А.Виноградова–Салтыкова

***a*** – поглотительная способность  
***D*** – диаметр, м  
***E*** – сигнал  
***k*** – коэффициент преобразования ПТП  
***H*** – толщина, м  
***q*** – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>  
***T*** – термодинамическая температура, К  
***X*** – характерный размер, м  
***α*** – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К)  
***δ*** – погрешность относительная  
***ε*** – степень черноты  
***λ*** – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)  
***Φ*** – расчетный коэффициент излучения  
***φ*** – угловой коэффициент излучения

**$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)** – постоянная Стефана-Больцмана

## СОКРАЩЕНИЯ

ИТИ – источник теплового излучения  
ОК – ограждающая конструкция  
ОС – окружающая среда  
ПТП – преобразователь теплового потока

## ИНДЕКСЫ

изм – измеренный  
к – к-тый элемент  
ОК – ограждающая конструкция  
ОС – окружающая среда  
ПАД – падающий  
ПОГЛ – поглощенный  
ПР – приведенный  
РАД – радиометр  
РЕЗ – результирующий  
СОБ – собственный  
***α*** – конвективный  
***ε*** – радиационный  
***Σ*** – суммарный.

Хоча спостерігається доволі великий розбіг експериментальних даних, але, як видно за наведених на рис.3.25 графіків, більшість цих точок лежать вздовж розрахункових кривих.

Середньоінтегральний тепловий потік за результатами контактних вимірювань за допомогою ПТП склав 252 Вт/м<sup>2</sup>, а за результатами безконтактних вимірювань температури та розрахунків із застосуванням формули (3.21) та відповідно 238 Вт/м<sup>2</sup>. Тобто розходження результатів контактних і безконтактних вимірювань не перевищує ±6%.