

УДК 536.532:536.629

ВОЗМОЖНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПОТЕРЬ 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 НТУУ «Киевский Политехнический институт»,

² Институт технической теплофизики НАН Украины,

³ Филиал Киевэнерго «Жилтеплоэнерго»,

⁴ Уманский национальный университет садоводства.

Предложена и внедрена методика бесконтактного определения тепловых потерь оборудования из уравнения Ньютона, с измерением температуры поверхности ограждения радиометром или пирометром, окружающего воздуха - термопарой или другим термометром, и с расчетом коэффициентов теплоотдачи из уравнений подобия или эмпирических формул, адекватность которых проверена для конкретных типов поверхностей и отвода теплоты.

Предложена методика бесконтактного определения тепловых потерь от наружных поверхностей теплотехнического оборудования в окружающую среду, которая позволяет точно и оперативно их определять. Методика рассматривает измерение температуры поверхности ограждения радиометром или пирометром и температуры окружающего воздуха непосредственно возле объекта, с дальнейшим сравнением корреляции между плотностью тепловых потоков и перепадом температур, измеренных для конкретных типов поверхностей и отвода теплоты.

Учтены конструктивные особенности объектов, степень черноты поверхностей, конвективные и лучистые составляющие теплообмена

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

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

Scope for contactless tests of heat losses from exterior surfaces of heating engineering equipment.

Scope for contactless tests of heat losses from exterior surfaces of heating engineering equipment.

Opportunities contactless detection of heat losses from exterior surfaces of heating engineering equipment.

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

¹ NTU of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"

² Kiev Enterprise "Kievenergo"

³ Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

⁴Umansky National University of gardening.

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 – от 10 до 4 кВт/м². При длине печи 75 м и диаметре 3,65 м общие потери от ограждения печи составляют около 6 МВт, а охладителя (длина 40 м, диаметр 2,54 м) – превышают 2 МВт. Изучали распределение температур t_n 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_g 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_l и конвективной q_k составляющих. Для расчета коэффициентов теплоотдачи — 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]:

$$q = \alpha (t_n - t_g): \quad \alpha = 9,54 + 0,85 (\Delta t)^{0,333}; \quad (1)$$

$$q = q_k + q_l; \quad (2)$$

$$q_k = \alpha_k (t_n - t_g): \quad \alpha_k = 0,95 \frac{(\Delta t_g)^{0,233}}{D^{0,3}}; \quad (3)$$

$$q_l = \varepsilon \sigma (T_n^4 - T_g^4). \quad (4)$$

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

Теплоэнергетические установки обычно имеют ограждения с лучшими изоляционными свойствами, чем теплотехнологическое оборудование, вместе с тем 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 $\Delta t = t_n - t_\theta$.

Статистическая обработка данных дала одинаковые значения α в диапазоне перепадов температур 10...60 К, а именно $\alpha = 12,7 \pm 0,4$ Вт/(м²·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 $\alpha = 12,0 \pm 0,5$ Вт/(м²·К).

Такие обобщения дают основания к переходу на бесконтактное определение теплопотерь по формуле $q = \alpha \cdot \Delta t$, однако достаточно близкое к функциональному соотношение q и Δt в условиях производственной эксплуатации котла было получено при определении $\Delta t = t_n - t_\theta$, когда t_θ 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 термопар термостатировали при

0°С, а t_6 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_6 для определения коэффициента теплоотдачи из тождества $\alpha = q / (t_n - t_6)$. Разброс опытных данных в системе $\Delta t - q$ оказался довольно большим, например, при $\Delta t = 30\text{К}$ измеренная 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 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 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_T с известной степенью черноты ϵ_T и того же тепломера,

облучаемого тем же лучистым потоком, но с приемной поверхностью, на которую наклеен оракал – $E_{ор}$:

$$\varepsilon_{ор} = \varepsilon_{т} E_{ор} / E_{т} \quad (5)$$

Статистически обоснованной величиной выявлена $\varepsilon_{ор} = 0,94$. Далее оракал наклеивали на часть испытуемого участка ограждения с одинаковой температурой поверхности. После измерения пирометром Fluke температуры поверхности, покрытой $T_{ор}$ и не покрытой $T_{пов}$ пленкой, определяли степень черноты испытуемой поверхности $\varepsilon_{пов}$:

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

Результаты измерения $\varepsilon_{пов}$:

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.

В ы в о д ы

Предложена методика бесконтактного определения тепловых потерь в окружающую среду от теплотехнического оборудования, основанная на использовании результатов обмера 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.

Подписи к рисункам:

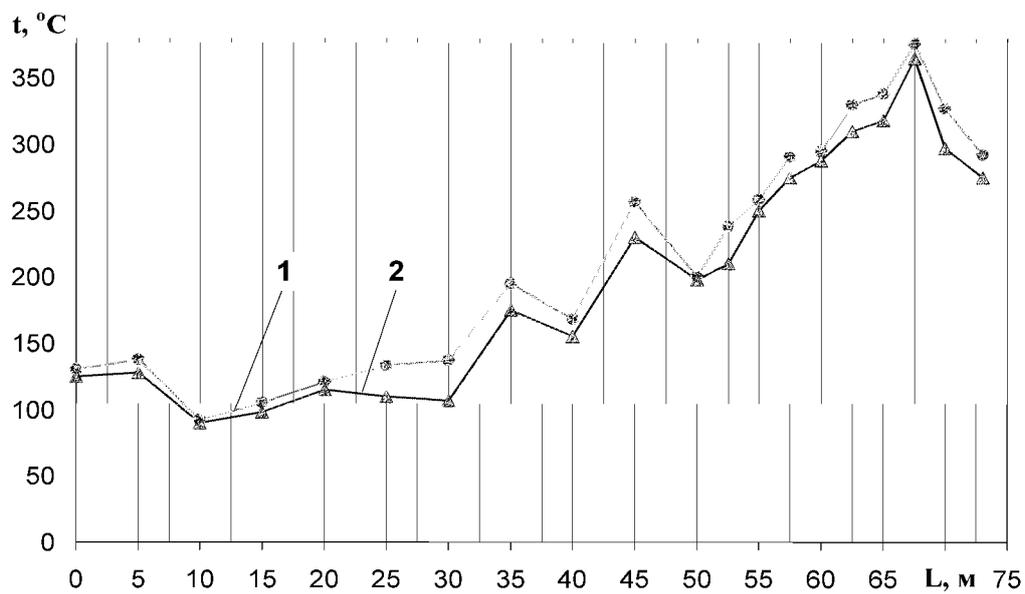
1. Распределение температур по поверхности печи обжига клинкера (а) и охладителя (б):
1 — t_{\max} , 2 — t_{\min} .

2. Расчетные значения плотности тепловых потоков от поверхности печи (а) и охладителя (б): 1 — q из уравнения (1), 2 — q из уравнений (2,3,4), 3 — лучистая составляющая, 4 — конвективная составляющая.

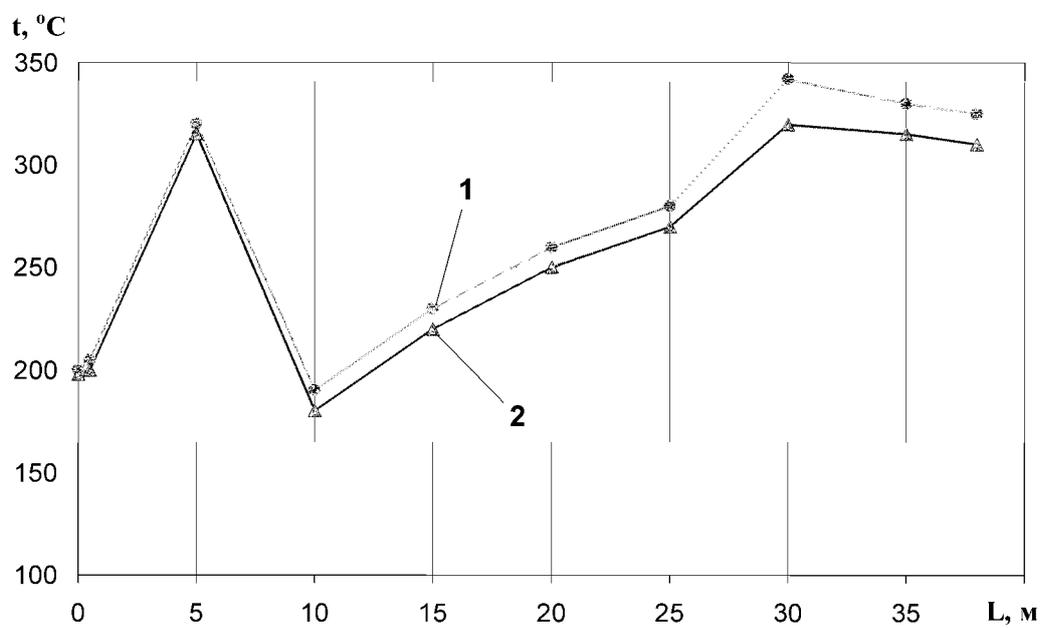
3. Гистограммы неравномерности теплотерь от котлов: а) — ТГМП-314А, б) — НИИСТУ-5, в) — ТВГ-4, г) — ДКВр-10м водогрейный.

Литература:

1. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров/Справочник. – Пер. с англ.– М.: Атомиздат, 1979. – 214 с.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха)/Учебник для вузов.– М.: Высш.школа, 1982. –415 с.
3. Федоров В.Г., Виноградов-Салтыков В.А., Новик М.И. Теплометрия наружных поверхностей котла ТГМП-314А // Экотехнологии 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 докільям // Розробники: Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделєєва Т.В., Воробйов Л.Й., Єрьоміна А.К. – Київ: Держстандарт України, 2001. – 43 с.
5. Виноградов-Салтыков В.А., Марценко В.П., Федоров В.Г. Корреляция температурных перепадов и теплотерь от ограждений водогрейных котлов// Промышленная теплотехника–К.: ИТТФ НАНУ, 2005, Том 27, №5, –С.76–78
6. Виноградов-Салтыков В.А., Марценко В.П., Федоров В.Г. Неравномерность теплотерь через ограждения водогрейных котлов.// Новости теплоснабжения – М.: 2005, № 2. С.23-24 .
7. Декуша Л.В., Т.Г.Грищенко, Зайцев В.Б. Установка для радиационной градуировки преобразователей теплового потока // Пром. теплотехника, 2003. – Приложение к № 4.– С.462 -464.



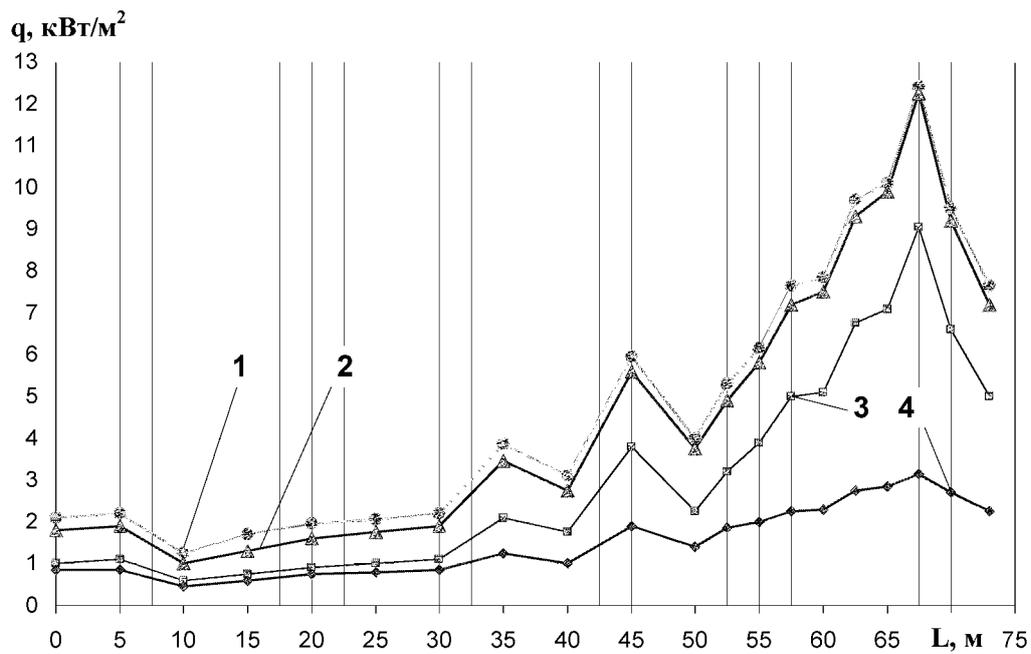
а



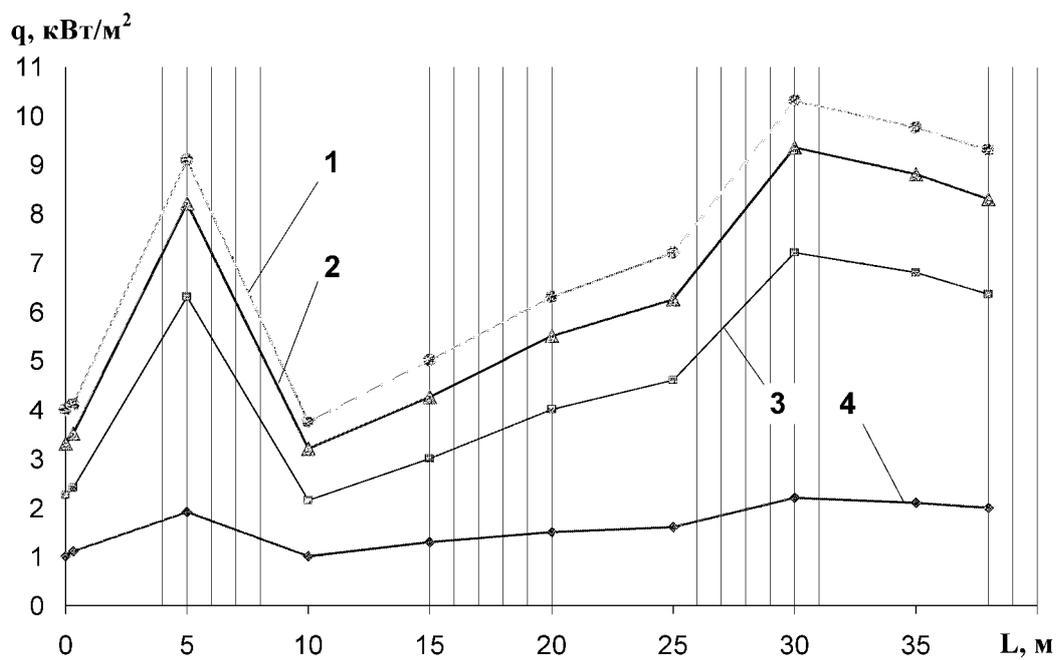
б

Рис.1. Распределение температур по поверхности печи обжига клинкера (а) и охладителя (б):

1 – t_{\max} , 2 – t_{\min}



а



б

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

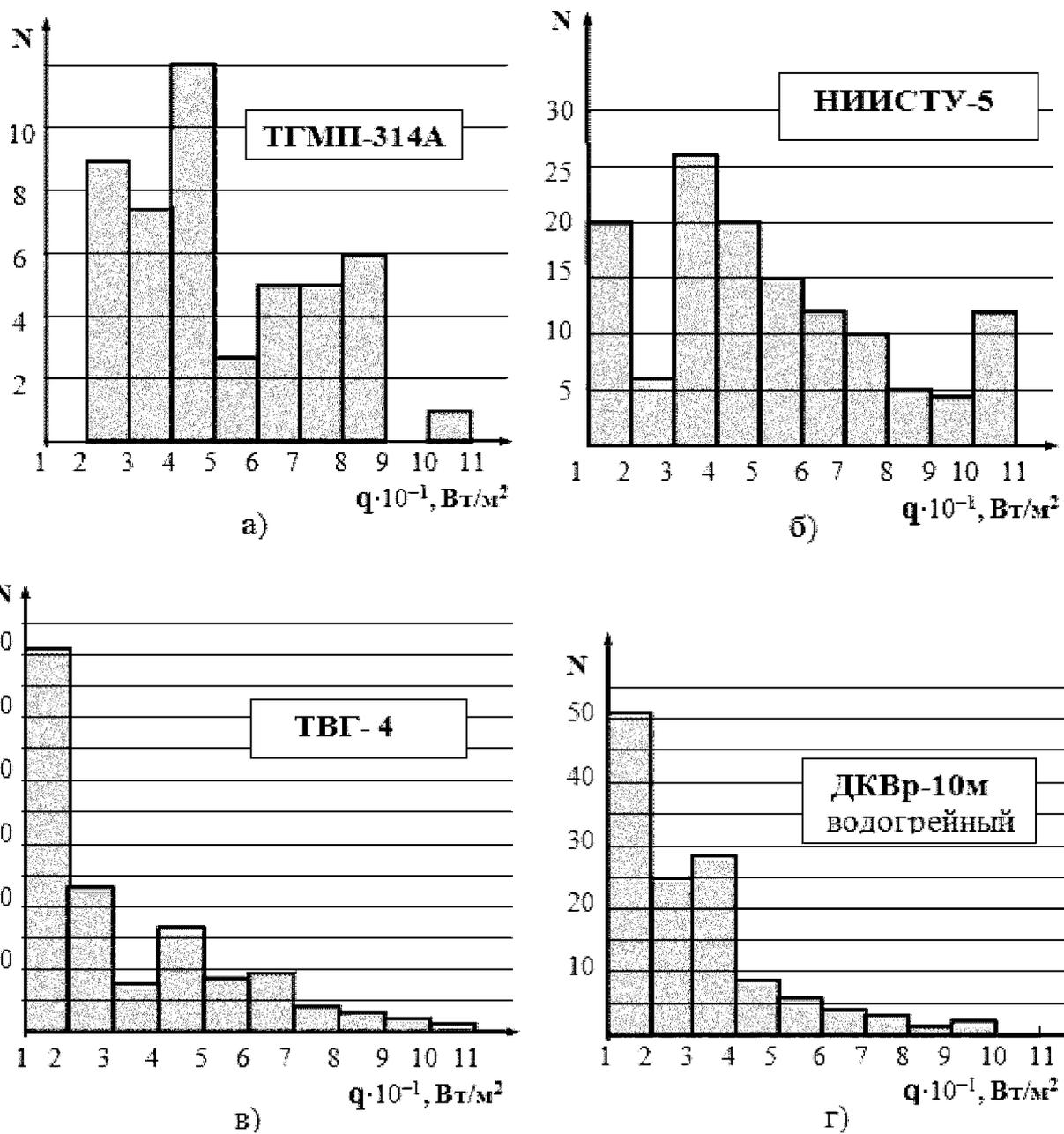


Рис.3. Гистограммы неравномерности теплотерь от котлов: а) – ТГМП-314А, б) – НИИСТУ-5, в) – ТВГ-4, г) – ДКВр-10м водогрейный.