

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БАШЕННЫХ ТРУБ-ГРАДИРЕН И РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ГРАДИРЕН В ПРОИЗВОДСТВЕ

Результаты значительного количества экспериментальных исследований [1–7] и натуральных испытаний доказана высокая эффективность подачи в башенную градирню выше уровня контакта охлаждающего воздуха с водой дымовых газов от паровых котлов и газотурбинных установок (ГТУ). В результате взаимодействия дымовых газов с паровоздушным потоком, выбрасываемым из градирни, происходит повышение температуры последнего, что приводит к увеличению высоты выбрасываемого факела. Это, в свою очередь, способствует интенсификации теплообменных процессов внутри градирни, увеличению дальности факела и усилению его раздробления окружающим воздухом до контакта с поверхностью земли. Исследованиями на физических моделях различных способов подачи дымовых газов в градирню, показано, что наиболее эффективной является предложенная автором подача дымовых газов, через установленную на горловине градирни кольцевую щель с тангенциальным вводом, обеспечивающим закрутку подаваемого потока газов. Такие конструктивные решения оголовка градирни рекомендованы для внедрения.

Ниже приводятся разработанная на основе результатов выполненных автором исследований процессов теплообмена и аэродинамики в башенных трубах-градирнях методика теплоаэродинамического расчета башенных градирен и результаты внедрения модернизированных градирен в производство.

1. Методика теплоаэродинамического расчета испарительной градирни башенного типа

1.1. Исходные данные должны быть:

- параметры наружного воздуха: t_n , i_n , d_n ;
- габаритные размеры градирни, а также площади входных отверстий (F_{np}), оросителей (F_{op}), выходного сечения (F_c), а также расстояние по вертикали между осью входных отверстий и горловиной градирни (H_0);

- плотность орошения (g , кг/(м²·с));
- приведенный к площади оросителей суммарный коэффициент местного сопротивления башни (ζ_{Σ});
- требуемая глубина охлаждения воды (δt_w), а также начальная (t_{wH}) и конечная (t_{wK}) ее температуры;
- массовый расход (G_g) и начальная температура газов (t_g), подаваемых от котлоагрегата или газотурбинной установки (ГТУ).

1.2. Определяем:

- *расход циркуляционной воды*

$$G_w = g \cdot F_{op}, \text{ кг/с}; \quad (1)$$

- *количество испаряющейся воды в зависимости от температуры наружного воздуха*

$$G_{исп_w} = K \cdot G_w \cdot \delta t_w, \text{ кг/с}; \quad (2)$$

- *явные тепловыделения, как результат теплообмена воздуха с водой*

$$Q_o = G_w \cdot c_w \cdot \delta t_w - G_{исп_w} \cdot i_{п}, \text{ Вт} \quad (3)$$

при этом трансмиссионными тепловыми потерями через ограждение градирни можно пренебречь:

- *эквивалентную площадь градирни*

$$F_3 = F_{op} / \sqrt{\zeta_{\Sigma}}, \text{ м}^2; \quad (4)$$

- *линейную характеристику*

$$K_l = (F_3 \cdot H_o^{1/2})^{2/5}, \text{ м}. \quad (5)$$

1.3. Вычисляем определяющие критерии

$$Gr_Q = 1,7 \cdot 10^{23} \cdot Q_o \cdot K_l^2 \cdot T_{н}^{-5,4}; \quad (6)$$

$$Ga = 3,29 \cdot 10^{19} \cdot K_l^3 \cdot T_{н}^{-3,6}. \quad (7)$$

1.4. Находим значения безразмерных массового расхода воздуха и избыточной температуры

$$Re_G = 1,175 \cdot Gr_Q^{1/3}; \quad (8)$$

$$Gu = 0,855 \cdot Gr_Q^{2/3} / Ga. \quad (9)$$

1.5. Определяем массовый расход и избыточную температуру воздуха на выходе из градирни

$$G_o = 1,93 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Re}_G \cdot K_l \cdot T_H^{0,8}; \quad (10)$$

$$\Delta t_o = Gu \cdot T_H. \quad (11)$$

1.6. Строим процесс изменения состояния воздуха на I-d диаграмме и по конечному и начальному его влагосодержаниям уточняют количество испарившейся воды

$$G'_{\text{исп}_w} = G_o \cdot (d_k - d_n) \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с}, \quad (12)$$

где: d_n, d_k – соответственно начальное и конечное влагосодержание воздуха, г/кг.

1.7. Если $G'_{\text{исп}_w}$ не совпадает с $G_{\text{исп}_w}$, то Q_o вычисляем снова, подставив в формулу $G'_{\text{исп}_w}$ и расчеты повторяем.

1.8. При подаче высокотемпературных газов ГТУ в башню-градирню определяем количество вносимой ими теплоты:

$$-t_0 = t_H + \Delta t_0, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (13)$$

$$-t_{\text{см}} = \frac{G_o \cdot c_o \cdot t_0 + G_\Gamma \cdot c_\Gamma \cdot t_\Gamma}{(G_o + G_\Gamma) \cdot c_{\text{см}}}, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (14)$$

$$-Q_\Gamma = G_\Gamma \cdot c_\Gamma \cdot (t_\Gamma - t_{\text{см}}), \text{ Вт}, \quad (15)$$

где: $c_o, c_\Gamma, c_{\text{см}}$ – удельные теплоемкости соответственно воздуха, газов и их смеси, Дж/(кг·К).

1.9. Представляем Q'_o как $Q_o + Q_\Gamma$ и расчеты выполняют снова.

1.10. Уравнение для определения высоты факела по оси

$$\Delta h = 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{Gr_Q \cdot K_l}{Ga} \right)^{1/3} \cdot T_H^{0,6} \cdot x^{2/3} / v_B^2. \quad (16)$$

Подставив в него (5), (6) и (7), получим

$$\Delta h = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{Q_o^{1/3} \cdot x^{2/3}}{v_B^2}. \quad (17)$$

Максимальная высота подъема факела над устьем градирни

$$\Delta h_{\max} = 9,55 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{Gr_Q^{1/3} \cdot K_l \cdot T_o \cdot T_u^{0,8}}{v_B \cdot R_o} \left(2,5 + 27,65 \frac{Gr_Q^{2/3} \cdot R_o}{Ga \cdot v_B^2} \right) \quad (18)$$

или

$$\Delta h_{\max} = 1,68 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(Q_o \cdot F_o^2 \cdot H_o)^{1/3}}{v_B \cdot R_o} \cdot \frac{T_o}{T_u} \left(2,5 + 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_o}{v_B^2} \cdot \left(\frac{(Q_o')^2}{F_o^2 \cdot H_o} \right)^{1/3} \right) \quad (19)$$

2. Внедрение и натурные испытания модернизированных градирен

Разработанные конструктивные решения и методика теплоаэродинамического расчета испарительных градирен башенного типа приняты в практику проектирования ведущих институтов теплоэнергoproект Украины (Киевского, Харьковского, Донецкого и т. д.).

Пилотный образец модернизации градирни внедрен на Киевской ТЭЦ 6. С целью проверки принятой в работе методики исследований распространения выбросного факела из градирни были выполнены натурные испытания на градирне до ее модернизации и после осуществления подачи в нее дымовых газов через расположенную у горловины кольцевую щель с тангенциальным вводом, для закрутки потока. Некоторые результаты натурных испытаний приведены на рис. 1–4. Для удобства сравнения на этих же рисунках приведены результаты экспериментальных исследований методом физического моделирования в аэродинамической трубе. Приведенные результаты указывают на вполне удовлетворительное для таких сложных многофакторных процессов совпадение экспериментальных и натурных данных (разница до 15%), причем для модернизированной градирни наблюдается еще более высокая сходимость результатов, что по-нашему мнению, служит дополнительным подтверждением повышения устойчивости выбросного факела градирни к действию ветра при создании на его начальном участке закрученной “оболочки” из дымовых газов. Таким образом, данные натурных испытаний по производительности и характеристикам градирни, с точностью до 15% совпадают с результатами исследований. Увеличение теплового коэффициента полезного действия градирни составляет 13,3–15,6%. Максимальная концентрация NO_x в приземном слое не превышает ПДК.

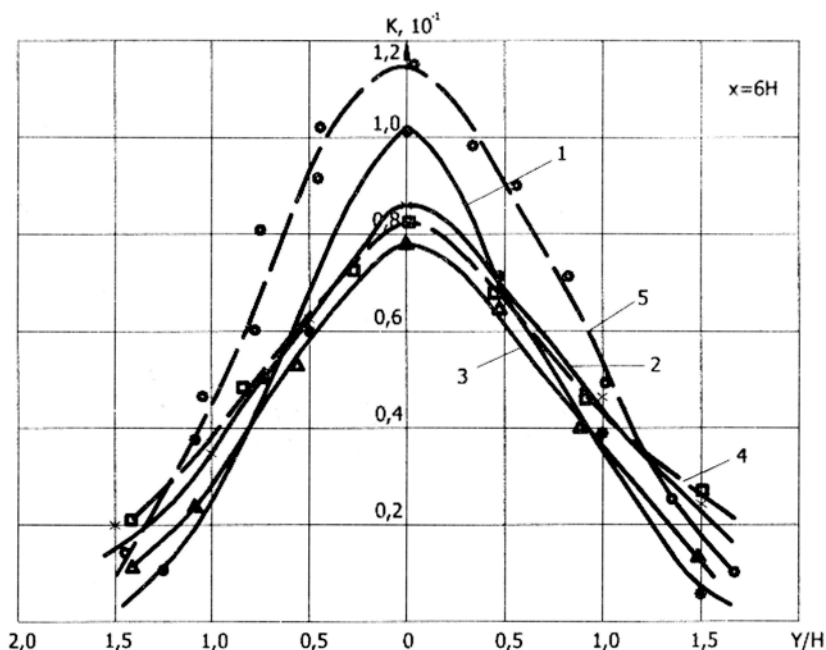


Рис. 1. Поперечные распределения безразмерных приземных величин K для выбросного факела градирни в сечении $X = 6H$. Скорость выбросного факела на выходе из градирни $w = 6$ м/с, скорость ветра $u = 6$ м/с

$$\left(\frac{w}{u} = 1 \right):$$

- 1 – без факельного выброса дымовых газов (эксперимент);
- 2 – скорость факельного выброса дымовых газов $w_0 = 15$ м/с (эксперимент);
- 3 – скорость закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20$ м/с (эксперимент);
- 4 – скорость закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20$ м/с (натурные испытания градирни после модернизации);
- 5 – без факельного выброса дымовых газов (натурные испытания до модернизации градирни)

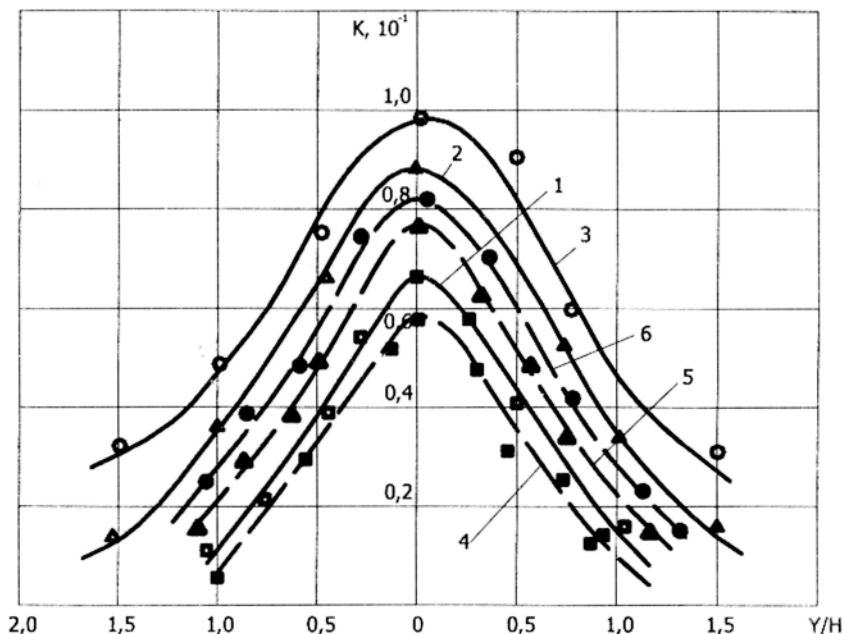


Рис. 2. Поперечные распределения безразмерных приземных величин K в различных сечениях потока выбросного факела из градирни при скорости выброса парогазовой смеси из градирни $w = 6$ м/с и скорости ветра $u = 6$ м/с $\left(\frac{w}{u} = 1\right)$. Скорость закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20$ м/с:

- 1 – в сечении $X = 4H$ (эксперимент);
- 2 – в сечении $X = 6H$ (эксперимент);
- 3 – в сечении $X = 9H$ (эксперимент);
- 4 – в сечении $X = 4H$ (натурные испытания после модернизации градирни);
- 5 – в сечении $X = 6H$ (натурные испытания после модернизации градирни);
- 6 – в сечении $X = 9H$ (натурные испытания после модернизации градирни).

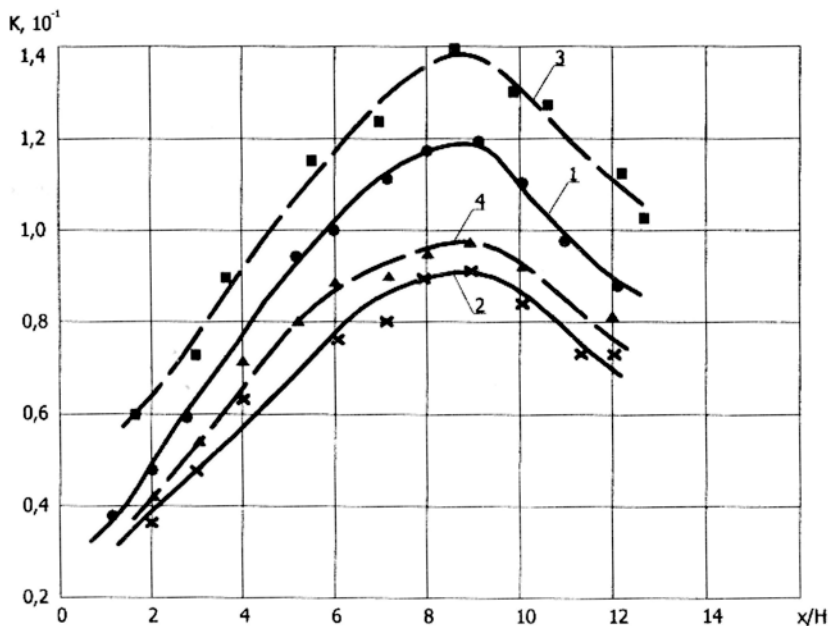


Рис. 3. Распределение безразмерных приземных величин K по потоку выбросного факела из градирни при скорости выброса паровоздушной смеси из градирни $w = 6 \text{ м/с}$ и скорости ветра $u = 6 \text{ м/с}$ $\left(\frac{w}{u} = 1\right)$:

- 1 – без факельного выброса дымовых газов в градирню (эксперимент);
- 2 – скорость закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20 \text{ м/с}$ (эксперимент);
- 3 – без факельного выброса дымовых газов в градирню (натурные исследования на градирне до модернизации);
- 4 – скорость закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20 \text{ м/с}$ (натурные исследования на градирне после модернизации)

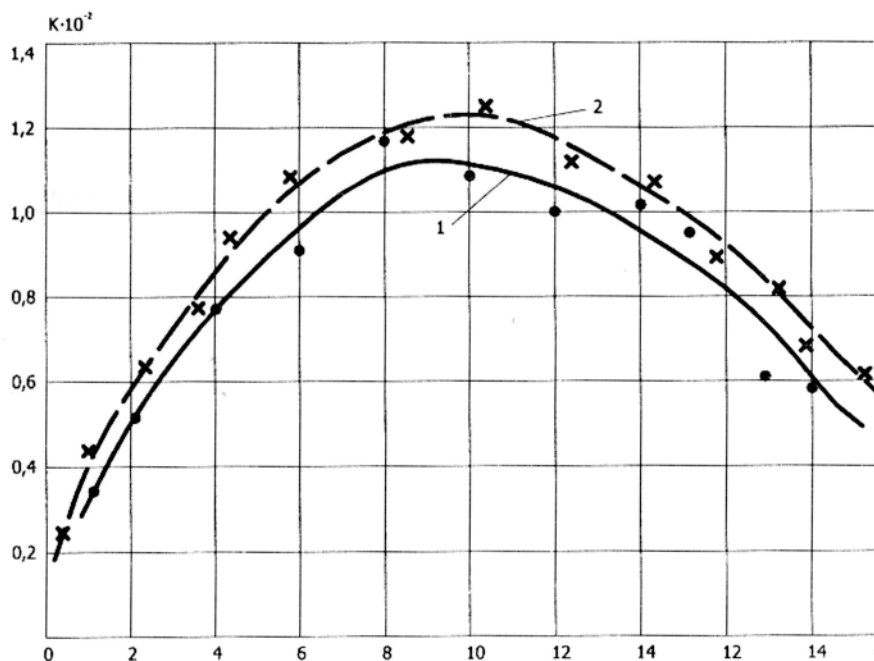


Рис. 4. Распределение безразмерных приземных величин K для NO_x по потоку для закрученного факельного выброса из щели с тангенциальным вводом дымовых газов $w_0 = 20$ м/с, скорость выброса паровоздушной смеси из градирни $w = 6$ м/с, скорость ветра $u = 6$ м/с, $\frac{w}{u} = 1$:

1 – эксперимент; 2 – натурные испытания градирни после модернизации

Выводы

1. На основании обработки данных экспериментальных исследований разработана приближенная методика теплоаэродинамического расчета испарительных башенных градирен, в том числе и с подачей в них отработанных газов от ГТУ (паровых котлов).

2. Полученные зависимости для определения расхода воздуха в градирне и избыточной его температуры на выходе из нее хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований во всем диапазоне их проведения, как при отсутствии подачи в градирню отработанных дымовых газов, так и при различных их количествах и способов подачи.

3. Разработанные конструктивные решения оголовка градирен и методика теплоаэродинамического расчета этих градирен приняты ведущими проектными институтами "Теплоэнергопроект" Украины.

4. Опытный образец модернизированной градирни внедрен на Киевской ТЭЦ-6.

5. Результаты натурных испытаний с точностью до 15% совпадают с данными экспериментальных исследований и подтверждают высокую техническую и экономическую эффективность предложенных методов и устройств организации воздухообмена для модернизации башенных градирен.

Использованная литература

1. Leidinger B., Natusck K., Sholl G. (Saarbergwerke A. G.) Rauchgasabfuhr über Kühltürme (Удаление дымовых газов через градирню) // *Bremst-Werme-Kraft*. – 1885. – 37. – № 10. – с. 373–379.

2. Angres Otried, Bush Sieter, Gabhard Georg, Orther Georg. Rauchgasableitung über Natursyugkühltürme (Отвод дымовых газов в атмосферу через башенные градирни) // *Energie*. 1988. – 40 – № 7. – с. 44–50.

3. Holter Heins, Igelbüscher Heurich, Gresch Heinrich, Dewert Heribert. Vorrichtung zur Einleitung von gewaschenen Rauchgasen in einen Kühlturm (Устройство для ввода очищенных газов в градирню). – Заявка № 3433707 от 14.04.84.

4. Holter Heins, Igelbüscher Heurich, Gresch Heinrich, Dewert Heribert. Einleitrohre in Kühltürmen (Трубы для подачи очищенных дымовых газов в градирни). Заявка ФРГ № 3437267 от 11.10.84.

5. Iorrek Sigurd, (Saarbergwerke A. G.) Anordnung zur Einleitung gereinigter vorwiegend habgereinigter Rauchgase in den Kühlturmstrom eines Kühlturmes. (Устройство для ввода дымовых газов в градирни (Заявка ФРГ № 3509542 от 16.03.85).

6. Дымовая труба-градирня. – А. С. 1451514, МКИ E04 H 12/28. Жидкович О. В., Зельцерман Е. А., Барышев А. И., Лашковский А. И. – опубликовано 1988; БИ № 4. – С. 113.

7. Дымовая труба-градирня. – А. С. 1451514, МКИ E04 H 12/28. Жидкович О. В., Зельцерман Е. А., Барышев А. И., Лашковский А. И. – опубликовано 1988; БИ № 47. – С. 143.