УДК 621.438

А.А. КУДИНОВ, д.т.н., профессор, зав. кафедрой (СамГТУ)
С.К. ЗИГАНШИНА, к.т.н., доцент, доцент (СамГТУ)
г. Самара

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ ТЭС ПУТЕМ ОТВОДА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ГТУ ЧЕРЕЗ ВЫТЯЖНУЮ БАШНЮ ГРАДИРНИ

При эксплуатации башенных градирен испарительного типа на тепловых электростанциях возникает проблема избыточного увлажнения атмосферного воздуха, что приводит к накоплению влаги зданиями и сооружениями, создает дискомфорт проживающих вблизи людей, снижает прозрачность атмосферного воздуха, а также приводит к изменению микроклимата в целом. Одним из направлений снижения увлажнения при испарительном охлаждении воды в башенных градирнях с естественной циркуляцией воздуха является увеличение высоты подъема, а также осушка паровоздушного факела, например, путем совместной работы градирни с выбросными устройствами продуктов сгорания после котельных агрегатов или котлов-утилизаторов газотурбинных установок (ГТУ) [1, 2].

В настоящей работе рассматривается возможность использования испарительной градирни башенного типа для отвода продуктов сгорания от котла-утилизатора ГТУ парогазовой установки. Тепловая схема парогазовой установки с отводом уходящих газов ГТУ через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха приведена на рисунке 1 [3]. Ниже приведены методика и результаты расчета башенной градирни, установленной на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ. Методика расчета заключается в следующем [4, 5]. Задавшись температурой воздуха на выходе из градирни, определяют самотягу. При условии равенства самотяги и аэродинамического сопротивления градирни находят скорость и расход воздуха. Тепловой расчет позволяет методом последовательных приближений определить температуру воздуха и воды на выходе из градирни. Расчетные значения сравнивают с принятыми.

Исходными данными для расчета являются: площадь оросителя F_{op}, м^2; высота оросителя H_{op}, м; высота градирни $H_{гр}$, м; диаметр основания башни $D_{осн}$, м; диаметр устья $D_{уст}$, м; высота воздуховходных окон $H_{ок}$, м; площадь воздуховходных окон $F_{ок}$, м^2; температура ϑ_1, °С и относительная влажность φ_1 наружного воздуха; барометрическое давление $p_б$, кПа; температура охлаждаемой воды на входе в градирню t_1, °С; расход циркуляционной воды $G_{ж}$, м^3/ч.

Произведены расчеты для двух случаев, а именно:

1) без осуществления отвода уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в вытяжную башню градирни;

2) с осуществлением отвода уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в вытяжную башню градирни в количестве $G_{г1}$=112,14 кг/с, $G_{г2}$=113,03 кг/с, $G_{г3}$=113,91 кг/с, $G_{г4}$=114,81 кг/с и $G_{г5}$=115,68 кг/с в соответствии с данными, приведенными в работах [6, 7].

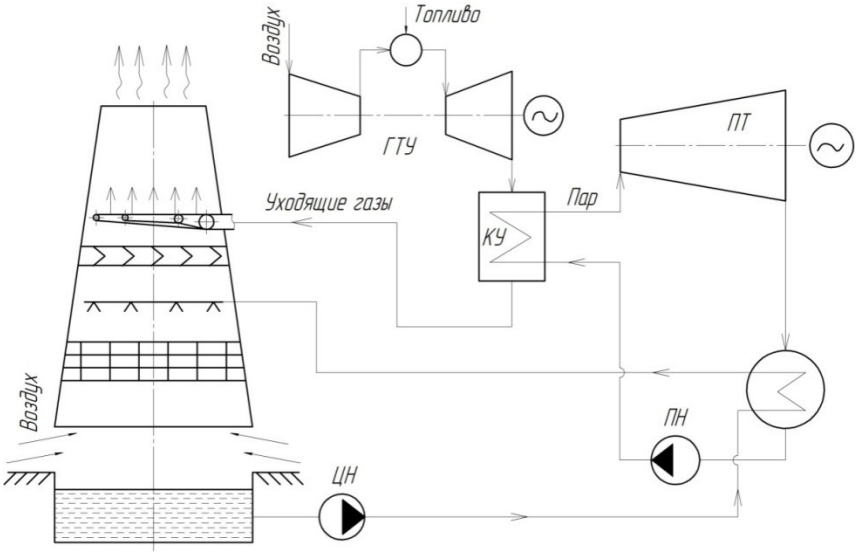

Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ с отводом дымовых газов газотурбинной установки через градирню

Расчет выполнен для башенной градирни, установленной на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Исходные данные: площадь оросителя F_{op} = 2350 м^2; высота оросителя H_{op} = 1 м; высота башни градирни $H_{гр}$ = 74,4 м; диаметр основания вытяжной башни градирни $D_{осн}$ = 60,4 м; диаметр устья вытяжной башни градирни $D_{уст}$ = 60,4 м; высота воздуховходных окон $H_{ок}$ = 6,5 м; площадь воздуховходных окон $F_{ок}$ = 1029,28 м^2; температура воздуха ϑ_1 = 21 °С; относительная влажность воздуха φ_1 = 54 %; барометрическое давление $p_б$ = 745 мм рт.ст. = 10128,71 кгс/м^2 = 99,085 кПа; температура охлаждаемой воды t_1=38 °С ; расход воды $G_{ж}$ = 14000 м^3/ч.

Таблица 1. Результаты расчета башенной градирни ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ

Наименование параметра, расчетная формула	Значение
Диаметр градирни в оросительной части, м $D_f = 1{,}128 \cdot \sqrt{F_{\text{ор}}}$	54,68
Половина длины воздухораспределителя, м $l = D_f / 4$	13,67
Гидравлическая нагрузка, $q_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} / F_{\text{ор}}$ м^3/(м^2 ·ч)	5,96
Отношение площади окон к площади оросителя, $F_{\text{ок}} / F_{\text{ор}}$	0,438

Высоты башни градирни, м $H_б = H_{гр} - H_{ок} - H_{ор}$	66,9
Принятая температура воздуха на выходе из градирни ϑ_2, °С	28
Парциальное давление насыщенных водяных паров: при ϑ_1 p''_{ϑ_1}, кгс/м^2 при ϑ_2 p''_{ϑ_2}, кгс/м^2	 253,4 385
Плотность насыщенных водяных паров: при ϑ_1 ρ''_{ϑ_1}, кг/м^3 при ϑ_2 ρ''_{ϑ_2}, кг/м^3	 0,0183 0,0272
Плотность воздуха начальная, кг/м^3 $\rho_1 = \dfrac{p_б - \varphi_1 \cdot p''_{\vartheta_1}}{R_в \cdot (\vartheta_1 + 273{,}15)} \cdot \varphi_1 \cdot \rho''_{\vartheta_1}$ Газовая постоянная для воздуха $R_в$, кгс·м/(кг·К)	1,17 29,27
Плотность воздуха конечная (при $\varphi_2 = 1$), кг/м^3 $\rho_г = \dfrac{p_б - \varphi_2 \cdot p''_{\vartheta_2}}{R_в \cdot (\vartheta_2 + 273{,}15)} \cdot \varphi_2 \cdot \rho''_{\vartheta_2}$	1,13
Коэффициент сопротивления оросителя $\xi_{ор}$, (рис. 8.2 [5])	18,2
Отношение $\xi_{ор}/\xi_{общ}$, (рис. 7.19 [5])	0,4
Общий коэффициент сопротивления градирни $\xi_{общ} = \dfrac{\xi_{ор}}{0{,}4}$	45,5
Самотяга градирни, Па $\Delta p = H_б \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)$	24,81
Средняя плотность воздуха, кг/м^3 $\rho_{ср} = (\rho_1 + \rho_2)/2$	1,15
Скорость воздуха в свободном сечении градирни, $\omega = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \Delta p}{\xi_{общ} \cdot \rho_{ср} k_\xi}}$ $k_\xi = 1{,}1$	0,93
Расход воздуха, кг/с $G_в = \rho_{ср} \cdot \omega \cdot S_{б.ср}$ Средняя площадь поперечного сечения башни, м^2 $S_{б.ср} = \dfrac{\pi}{4} \cdot \left(\dfrac{D_{осн} + D_{уст}}{2} \right)^2$	1942,7 1818,1
Удельный расход воздуха $\lambda = G_в / G_ж$	0,5
Температура воздуха по смоченному термометру τ, °С для ϑ_1, φ_1 (по диаграмме Молье)	15
Характеристики оросителя [5]: A m	 1,41 0,54
Теплоемкость воды $c_ж$, кДж/(кг·К)	4,1868
Теплота парообразования r, кДж/кг стр. 65 [5]	2493
Принимаем температуру воды на выходе из градирни t_2, °С	29

Вспомогательный коэффициент: $k = 1 - \frac{t_{2ж} \cdot c}{r}$	0,951
Плотность воздуха при температуре ϑ_1 ρ_{ϑ_1}, кг/м^3	1,2
Давление насыщения пара, кгс/м^2, при температуре t_1, °С : p''_{t_1} t_2, °С : p''_{t_2}	 676 408
Плотность пара, кг/м^3, при температуре t_1, °С : ρ''_{t_1} t_2, °С : ρ''_{t_2}	 0,046 0,028
Средняя температура воды в градирне, °С $t_m = t_{ср} = (t_1 + t_2)/2$	33,5
Давление насыщенного пара при t_m, p''_{t_m}, кгс/м^2 Плотность насыщенного пара при t_m, ρ''_{t_m}, кг/м^3	527,5 0,036
Разность температур воды в градирне $\Delta t = t_1 - t_2$, °С	9
Величины удельных энтальпий воздуха, кДж/кг $i''_1 = t_1 + \frac{\varphi_{2в} \cdot \rho''_{t_1} \cdot R \cdot (t + 273{,}15)}{p_б - \varphi_2 \cdot p''_{t_1}} \cdot (r + 1{,}9693 \cdot t_1)$ $i''_2 = f(t_2, \varphi_{2б}\, p)$ $i''_1 = f(\vartheta_1, \varphi_{1б}\, p)$ $i''_m = f(t_m, \varphi_{2б}\, p)$	 152,55 95,58 42,58 121,17
Поправка к энтальпии $\delta''_i = \frac{i''_1 + i''_2 - 2i''_m}{4}$	1,44
Энтальпия воды на выходе из градирни, кДж/кг $i_2 = i_1 + \frac{c_ж \cdot \Delta t}{k \cdot \lambda}$	121,93
Средняя разность энтальпий, кДж/кг $\Delta i_{ср} = \frac{(i''_1 - i_2) - (i''_2 - i_1)}{\ln\left(\frac{i''_1 - i_2 - \delta''_i}{i''_2 - i_1 - \delta''_i}\right)}$	39,3
Температура охлажденной воды, °С $t'_2 = t_1 - \frac{A \cdot \lambda^m \cdot H_{ор} \cdot k \cdot \Delta i_{ср}}{c_ж}$	29,35
Погрешность между принятой и полученной величинами $\delta = \lvert t_2 - t'_2 \rvert / t'_2$	0,01
Объемный коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м^3·ч) $\beta_{xυ} = A \cdot \lambda^m \cdot q_ж$	5,77
Безразмерный критерий Меркеля $Me = \frac{\beta_{xυ} \cdot H_{ор}}{q_ж} = \frac{\Delta t \cdot c_ж}{k \cdot \Delta i_{ср}} = A \cdot H_{ор} \cdot \lambda^m$	0,97

Анализ результатов расчетов показал, что при применении отвода

уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в объеме $G_{г5} = 115{,}68$ кг/с относительно случая без применения отвода уходящих газов через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха, самотяга Δp вытяжной башни градирни возрастает с 24,81 Па до 32,8 Па (на 32%), общий коэффициент сопротивления градирни $\xi_{общ}$ возрастает с 45,5 до 53,5 (на 17%), при этом температура циркуляционной воды t_2 на выходе из градирни снижается на 6,9% с 29 °С до 27 °С (рассматривается теплый период года), что обеспечивает более глубокий вакуум в конденсаторе паровой турбины парогазовой установки.

Таким образом, применение отвода дымовых газов ГТУ в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха позволяет не только улучшить микроклимат на прилегающей территории, но и повысить эффективность работы градирни и паротурбинной установки ПГУ, а также избежать затрат на строительство и обслуживание дымовой трубы.

Список литературы:

1. Буров, В.Д. Тепловые электрические станции: учебник для вузов [Текст] / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др. – М.: МЭИ, 2005. – 454 с.

2. Кудинов, А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование [Текст] / А.А. Кудинов – М.: ИНФРА-М, 2012. – 325 с.

3. Патент № 2453712 (RU). МПК[7] F01K23/10. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, С.П. Горланов // Б.И. № 17, 2012.

4. Горланов, С.П. Отвод уходящих газов ГТУ через вытяжную башню градирни тепловой электростанции [Текст]: матер. 72-й Всерос. науч.-техн. конф. «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре». Сб. статей: Естественные науки и техносферная безопасность / С.П. Горланов, А.А. Кудинов // Самара: СГАСУ, 2015. – С. 191-197.

5. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий [Текст] / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

6. Кудинов, А.А. Парогазовые установки тепловых электрических станций [Текст] / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2014. – 210 с.

7. Кудинов, А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях [Текст]: монография / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.