

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТВОДА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ НА БЛОКЕ ПГУ КЭС

Р.Р. Исянов\*, И.А. Ростунцова\*

\* Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [rostunzeva@mail.ru](mailto:rostunzeva@mail.ru)

*Аннотация.* Предлагается схема комбинированного отвода уходящих газов парогазовых установок с применением градирни. Разработана методика определения эффективности схемы. Предложенное использование градирни является альтернативным вариантом по установке дымовых труб на КЭС.

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, уходящие газы, эффективность схемы, испарительная градирня.

## ANALYSIS OF EFFICACY OF COMBINED FLUE GAS REMOVAL SYSTEM ON THE BLOCK PSU IES

R.R. Isyanov \*, I.A. Rostuntsova \*

\* Yuri Gagarin state technical university of Saratov,  
Saratov, Russia, [rostunzeva@mail.ru](mailto:rostunzeva@mail.ru)

*Annotation.* The scheme of the combined discharge of flue gas combined-cycle plants with cooling towers. A method for determining the effectiveness of the scheme. The proposed use of the cooling tower is an alternative for installing chimneys in the IES.

*Keywords:* gas turbine, the exhaust gases, the efficiency of the circuit evaporative cooling tower.

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 является увеличение высоты подъема, а также осушка паровоздушного факела, например, путем комбинированной работы градирни с выбросными устройствами продуктов сгорания, после котлоагрегатов или газотурбинных установок (ГТУ) [1]. При этом также решается еще одна задача - это более глубокое охлаждение газов газотурбинной установки в составе ПГУ. Поэтому разработка и оценка эффективности схемы комбинированного отвода уходящих газов ГТУ с применением градирни является актуальной задачей.

Для глубокого охлаждения уходящих газов ГТУ применена схема их отвода через башенную градирню испарительного типа (рис.1).

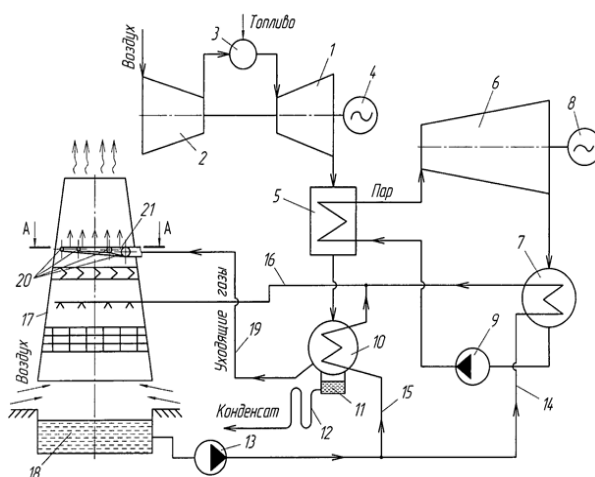


Рис.1. Схема глубокого охлаждения уходящих газов ГТУ с применением градирни

Парогазовая установка схемы (рис.1) содержит газотурбинную установку, состоящую из газовой турбины 1, турбокомпрессора 2, камеры сгорания 3 и электрогенератора 4, котел-утилизатор 5, паротурбинную установку, состоящую из паровой турбины 6 с конденсатором 7, электрического генератора 8 и питательного насоса 9, теплообменник-утилизатор 10 теплоты уходящих газов, снабженный конденсатосборником 11 с гидрозатвором 12, систему оборотного водоснабжения, включающую циркуляционный насос 13, напорный трубопровод 14 к конденсатору 7 паровой турбины 6, напорный трубопровод 15 к теплообменнику-утилизатору 10 теплоты уходящих газов и сливной напорный трубопровод 16 к градирне, состоящей из вытяжной башни 17 и водосборного бассейна 18, трубопровод 19, соединяющий теплообменник-утилизатор 10 теплоты уходящих газов с распределительным устройством, установленным в вытяжной башне 17 градирни и состоящим из двух кольцевых перфорированных коллекторов 20 переменного поперечного сечения, соединенных между собой патрубком 21.

При пропуске уходящих газов ГТУ температура циркуляционной воды на выходе из градирни будет определяться снижением влажности воздуха и увеличением самотяги градирни (дополнительное охлаждение за счет притока воздуха в результате увеличения тяги градирни).

Относительная влажность воздуха зависит от количества влаги находящейся в нем, последнее определяется парциальным давлением водяных паров в воздухе. Парциальное давления водяных паров при различной подаче уходящих газов определяется по формуле

$$P = \frac{m_i \cdot R \cdot T_{см}}{V_{см}}, \text{кПа} \quad (1)$$

где  $m_i$  – молярная масса смеси, г/моль; R – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ ); T – температура уходящих газов, град. К; V – молярный объем, м<sup>3</sup>/моль.

Результаты расчета парциального давления при различной подаче уходящих газов в градирню представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетное значение парциального давления водяных паров на выходе из градирни

Относительный расход уходящих газов $V_{г}$ ,	%	20	40	60	80	100
Парциальное давление водяных паров в воздухе, $P_{п}$	кПа	14,4	14,2	14,0	13,9	13,7

Результаты расчета парциального давления в зависимости от количества подаваемых газов ГТУ в градирню представлены на рис.2.

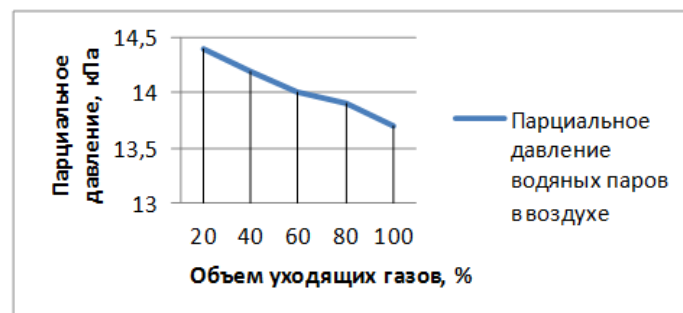


Рис. 2. Изменение парциального давления в зависимости от пропуска уходящих газов ГТУ через градирню

В зависимости от изменения парциального давления водяных паров по *i-d* диаграмме определены относительная влажность воздуха и температура циркуляционной воды на выходе из градирни. Результаты представлены в табл.2 и на рис.3.

Таблица 2. Результаты изменения относительной влажности воздуха и температуры циркуляционной воды на выходе из градирни

Относительный расход уходящих газов $V_{г,}$	%	20	40	60	80	100
Температура на выходе из градирни, $t_{1в,}$	°С	28,6	27,7	26,9	26,1	25,5
Относительная влажность воздуха, $\phi$	%	69,2	68,30	67,10	66,0	64,0

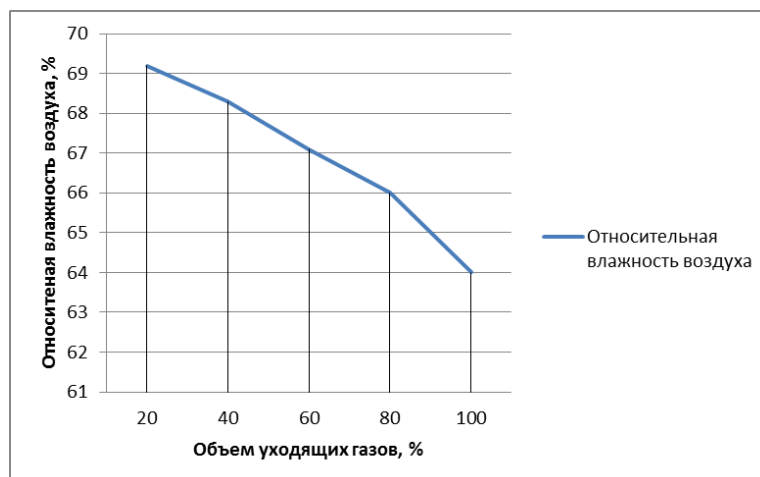


Рис. 3. Изменение относительной влажности в зависимости от объема пропуска уходящих газов ГТУ через градирню

Эффективность работы блока ПГУ особенно его паровой части определяется снижением давления в конденсаторе, что создает более глубокий вакуум в самом конденсаторе и на последних ступенях паровой турбины. Давление в конденсаторе зависит главным образом от температуры охлаждающей воды. Расчетные зависимости давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды показаны в табл. 3 и на рис.4.

Таблица 3 – Результаты расчета давления в конденсаторе при изменении температуры на выходе из градирни

Температура на выходе из градирни, $t_{1в,}$	°С	28,6	27,7	26,9	26,1	25,5
Давление в конденсаторе, $P_{к}$	кПа	4,1	3,92	3,72	3,6	3,51

На рис. 4 также показано изменение температуры на выходе и входе в градирню от расхода подаваемых газов ГТУ.

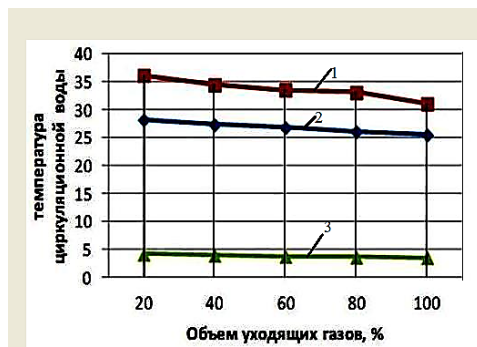


Рис. 4 – Изменение температуры циркуляционной воды и давления в конденсаторе в зависимости от расхода уходящих газов ГТУ через градирню:  
 1- температура на выходе из градирни, °C;  
 2- температура на входе в градирню, °C;  
 3 – давление в конденсаторе, кПа

При пропуске уходящих газов через градирню изменяется самотяга охлаждающего устройства. Величина самотяги градирни определяется по выражению:

$$\Delta p = H_6 \cdot g \cdot (p_1 - p_2) , \quad (2)$$

где:  $p_1$  ,  $p_2$  – плотность воздуха начальная и конечная, кг/м<sup>3</sup>;  $H_6$  – высота башни градирни, м;  $g$  – скорость свободного падения, м/с.

Расчетные значения изменения самотяги градирни показаны в табл.4 и на рис.5.

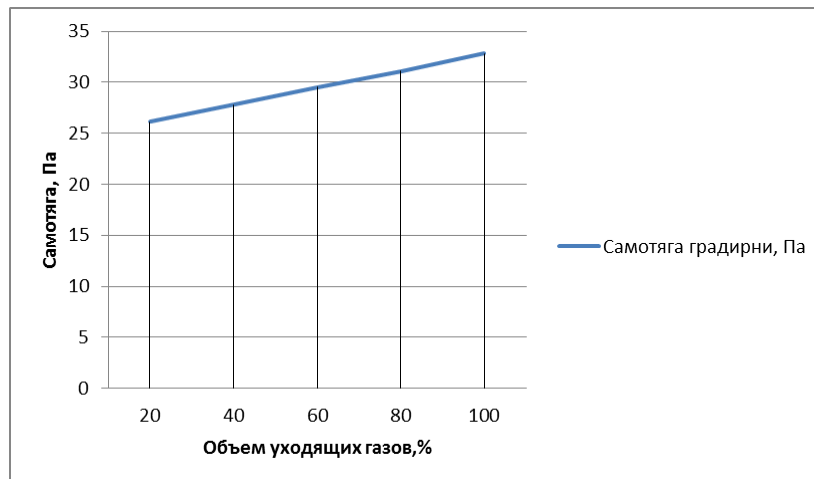


Рис. 5. Изменение самотяги градирни в зависимости от пропуска уходящих газов ГТУ через градирню

Таблица 4 – Результаты расчета самотяги градирни при вводе уходящих газов ГТУ

Относительный расход уходящих газов, $V_r$ , %	20	40	60	80	100
Самотяга градирни, $\Delta p$ , Па	26,12	27,8	29,51	31,1	32,8

Проведен расчет эффективности отвода уходящих газов ГТУ через градирню. Определена температура циркуляционной воды на выходе из охлаждающего устройство при различном объеме пропуска газов через градирню. Температура воды определялась исходя из баланса:

$$D_k \cdot (h_n^s - h_B^s) \cdot \eta_k = G_B \cdot (t_{2B} - t_{1B}) \cdot c_p , \quad (3)$$

$$t_{1B} = t_{2B} - \frac{D_k (h_n^s - h_B^s) \cdot \eta_k}{G_B \cdot c_p} , \quad (4)$$

где  $D_k$  – расход пара в конденсатор, кг/с;  $h_n^s$  – энтальпия пара в конденсаторе, кДж/кг;  $h_B^s$  – энтальпия конденсата, кДж/кг;  $\eta_k$  – КПД конденсатора;  $G_B$  – расход циркуляционной воды, кг/с;  $t_{1B}$  – температура циркуляционной воды на выходе из

градирни °С;  $t_{2в}$  – температура циркуляционной воды на входе в градирню °С;  $c_p$  – теплоемкость воды кДж/кг·град ( $c_p=4,19$  кДж/кг·град)

Итоговые результаты оценки эффективности глубокого охлаждения газов ГТУ пропуском через башенную градирню представлены в табл. 5.

Таблица 5. Итоговые результаты оценка эффективности глубокого охлаждения газов ГТУ пропуском через башенную градирню

Объем уходящих газов, $V_g$	%	0	20	40	60	80	100
Относительная влажность воздуха, $\phi$	%	70,0	69,2	68,30	67,10	66,0	64,0
Объем уходящих газов, $G_g$ ,	кг/с	0	126,3	252,6	378,9	505,2	631,5
Парциальное давление водяных паров в воздухе, $P_{п}$ ,	кПа	15	14,4	14,2	14,0	13,9	13,7
Температура наружного воздуха, $t_{нв}$ ,	°С	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Температура на выходе из градирни, $t_{2к}$ ,	°С	29,4	28,2	27,3	26,8	26,1	25,5
Температура на входе в градирню, $t_{1к}$	°С	37,42	36,2	34,5	33,6	33,1	31,1
Самотяга градирни, $\Delta p$	Па	24,81	26,12	27,8	29,51	31,1	32,8

Таким образом, рассмотрена схема глубокого охлаждения уходящих газов газотурбинной установки с применением градирни и разработаны методические положения оценки эффективности схемы.

Анализ результатов показал, что с применением отвода дымовых газов ГТУ в объеме  $G_g = 631,5$  кг/с, относительно случая без применения отвода дымовых газов в вытяжную башню градирни, самотяга  $\Delta p$  возрастает на 30%, общий коэффициент сопротивления градирни возрастает на 17%, при этом температура циркуляционной воды  $t_{2к}$  на выходе из градирни снижается на 13 % с 29,4 до 25,5 °С, что обеспечивает более глубокий вакуум в конденсаторе паровой турбины парогазовой установки. За счет последнего фактора изменяется также температура на входе в градирню.

Применение отвода дымовых газов ГТУ в атмосферу через вытяжную башню градирни позволяет не только улучшить микроклимат на прилегающей территории за счет снижения влажности воздуха от градирни, но и повысить эффективность работы блока за счет снижения температуры циркуляционной воды на выходе из градирни.

Предложенное использование градирни является альтернативным вариантом по установке дымовых труб на КЭС, так как позволяет избежать затрат на строительство и обслуживание дымовой трубы. В данном случае градирня может использоваться в качестве постоянной дымовой трубы или использоваться как резерв в особо неблагоприятных метеорологических условиях.

### Библиографический список

1. Тепловые электрические станции / В.Д. Буров, Е.В.Дорохов, Д.П. Елизаров и др. М.: Издательство МЭИ, 2005. 380 с.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998, 376 с.
3. Парогазовая установка электростанций: пат. №2453712 (RU)/ МПК F01K23/10. /Кудинов А.А. и др. Бюл. №17, 2012.