

УДК 621.036.7

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОДЫ И ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Фиалко Н.М., чл.-корр. НАН Украины, Навродская Р.А., канд. техн. наук, Степанова А.И., канд. техн. наук, Гнедаш Г.А., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

Викладено результати аналізу ефективності та оптимізації режимних параметрів теплоутилізаторів котельної установки, призначених для підігрівання води та дутьового повітря.

Изложены результаты анализа эффективности и оптимизации режимных параметров теплоутилизаторов котельной установки, предназначенных для подогрева воды и дутьевого воздуха.

There are exposed results of analysis for efficiency and optimization of working parameters of thermoutilyzers of boiler plant for heating of water and combustion air.

Библ. 6, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: теплоутилизационная установка, оптимизация, критерий эффективности.

c_p – удельная изобарная теплоемкость;
 E_p – эксергетическая мощность;
 G – массовый расход теплоносителя;
 i – удельная энтальпия;
 m – масса;
 p – давление;
 p_s – давление насыщенного пара;
 Q – тепловая мощность;
 R – газовая постоянная;
 s – удельная энтропия;
 T – абсолютная температура;
 t – температура;
 W – влагосодержание;

v – удельный объем;
 μ – молекулярная масса;
 ρ – плотность.

Индексы верхние:

дг, вод, возд, п – дымовые газы, вода, воздух, пар;
 внут – внутренний.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной параметры;
 о – окружающая среда;
 пот – потери.

Обеспечение энергосбережения и экологической безопасности за счет повышения эффективности энергетических объектов является важным направлением развития экономики и социальной сферы в Украине на ближайшее время и на дальнейшую перспективу. Один из важнейших этапов в этом направлении – разработка и внедрение на предприятиях коммунальной энергетики эффективных теплоутилизационных технологий. Среди причин, которые сдерживают широкое внедрение существующих технологий, предназначенных для подогрева обратной теплосетевой воды, является их недостаточная эффективность при определенных режимах эксплуатации. Речь идет об

ограниченности работы теплоутилизационных установок в конденсационном режиме, то есть с глубокой утилизацией теплоты, в продолжении всего отопительного периода. Современное состояние проблемы характеризуется тенденцией к разработке и внедрению новых теплоутилизационных установок, в которых осуществляется комбинированное использование утилизированной теплоты для подогрева обратной теплосетевой воды и более холодного теплоносителя, например, сырой воды системы химводоочистки (ХВО) или дутьевого воздуха. Такие установки позволяют осуществлять глубокую утилизацию теплоты в продолжении всего отопительного периода.

Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных установок различного типа могут быть использованы эксергетический подход и метод многоуровневой оптимизации [1-3]. В работах [2, 4] проведен анализ эффективности теплоутилизационных установок, одна из которых предназначена для подогрева обратной теплосетевой воды, а вторая – для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха. При этом показаны преимущества метода многоуровневой оптимизации, использование которого при решении оптимизационных задач позволяет рассчитать значения режимных и конструкционных параметров, максимально приближенные к оптимальным, что повышает эффективность теплоутилизационной установки, в среднем, на 2,5 %.

Для более рационального использования

метода многоуровневой оптимизации целесообразно провести анализ эффективности и оптимизацию режимных параметров отдельных элементов установок, изменение эксергетических потерь в которых наиболее сильно влияет на изменение эффективности системы в целом. Предварительная оптимизация параметров таких элементов, находящихся на определенных уровнях оптимизации в блок-схеме многоуровневой оптимизации, позволит использовать полученные для них значения оптимальных параметров в качестве начальных параметров для решения локальных оптимизационных задач других уровней. В процессе решения общей оптимизационной задачи значения оптимальных параметров отдельных элементов установки могут быть уточнены. Такой подход позволяет не только оценить

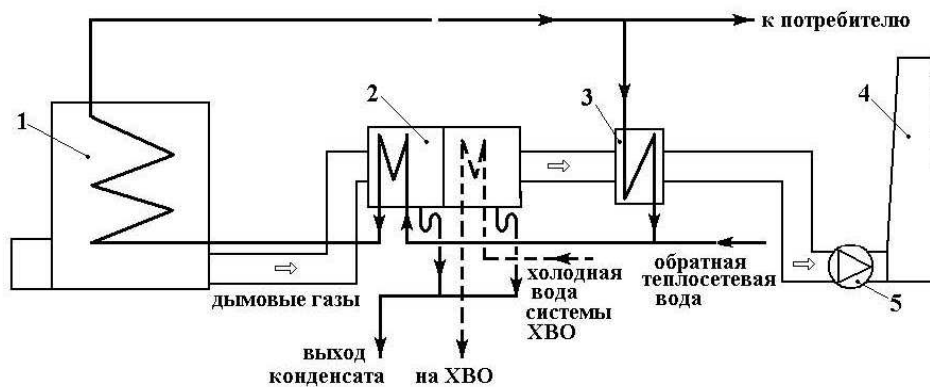


Рис. 1. Принципиальная схема теплоутилизационной установки с использованием водогрейного теплоутилизатора: 1 – котел; 2 – подогреватель воды теплосети и системы ХВО; 3 – газоподогреватель; 4 – дымовая труба; 5 – дымосос.

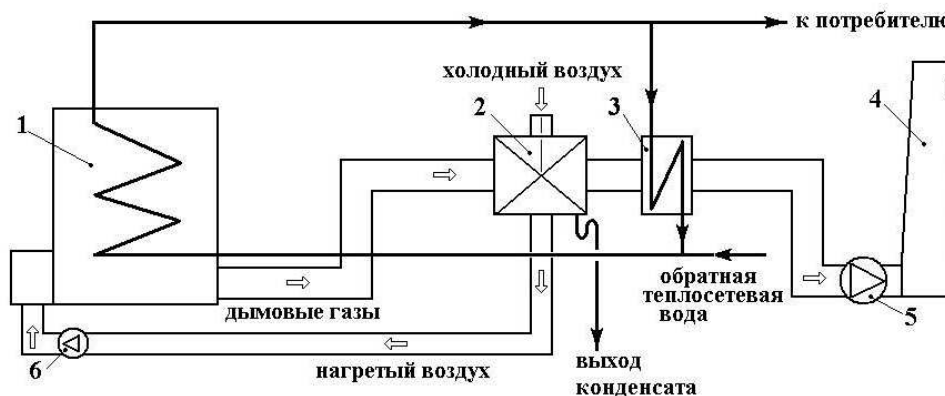


Рис. 2. Принципиальная схема теплоутилизационной установки с использованием воздухогрейного теплоутилизатора: 1 – котел; 2 – воздухоподогреватель; 3 – газоподогреватель; 4 – дымовая труба; 5 – дымосос; 6 – вентилятор.

теплотехническое и термодинамическое совершенство отдельных элементов теплоутилизационной установки и провести анализ их эффективности, но и повысить точность решения общей оптимизационной задачи, а также уменьшить объем расчетов.

Цель работы – оптимизация и анализ эффективности поверхностных теплоутилизаторов котлов: конденсационных водоподогревателя и воздухоподогревателя, предназначенных соответственно для подогрева воды различного назначения и дутьевого воздуха котлоагрегата.

Указанные теплоутилизаторы являются основными элементами теплоутилизационных установок, примеры схем которых представлены на рис.1, 2. В этих элементах изменение эксергетических потерь наиболее сильно влияет на изменение эффективности установок в целом.

При проведении исследований принималось во внимание, что теплообменная поверхность водоподогревателя представляет собой пучок оребренных биметаллических труб (стальная основа и алюминиевое оребрение), а воздухоподогревателя – пакет пластин из легированной стали. Температура воды на входе в водоподогреватель изменялась в пределах 5...70 °С. Диапазон изменения входной температуры воздуха принимался равным 20...10 °С. При этом влагосодержание дымовых газов на входе и выходе теплоутилизаторов изменялось в пределах $W_{вх}^{дг} = 0,09...0,13$ кг/кг с.г. и $W_{вых}^{дг} = 0,04...0,09$

кг/кг с.г., а влагосодержание воздуха принималось постоянным. Расчеты выполнялись при 100 % нагрузке котла и температуре его отходящих газов близкой к 160 °С. Пределы изменения чисел $Re^{дг}/Re^{вод}$ и $Re^{дг}/Re^{возд}$ составляли 0,80...1,20.

В качестве целевых функций оптимизации указанных элементов теплоутилизационных установок использовались тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии эффективности: $\varepsilon = E_{пот}^{внут} / Q$, $k_{ex}^r = E_{пот}^{внут} \cdot m / Q^2$. Для определения функциональных зависимостей целевых функций оптимизации от параметров объектов использовались статистические методы планирования эксперимента, которые позволяют искать указанные зависимости (уравнения регрессии) в виде квадратичного полинома [5]:

$$f(x_1...x_n) = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k x_k + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{k=1}^n a_{kk} x_k^2. \quad (1)$$

Расчет соответствующих значений критериев эффективности, которые служили целевыми функциями оптимизации, в пятнадцати точках композиционного плана проводился в соответствии с соотношениями, которые учитывают изменение влагосодержания дымовых газов после прохождения через указанные элементы теплоутилизационной установки.

В качестве примера приведены соотношения для тепло-эксергетического критерия эффективности.

Для водоподогревателя:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1 / Q \left\{ G^{дг} \left[c_p^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_p^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{s_{вх}} \varphi_{вх}^{дг}}{p_{вых}^{дг} - p_{s_{вых}} \varphi_{вых}^{дг}} \right) \right] - \right. \\ & - G^{дг} W_{вых}^{дг} \left[c_p^{п} (T_{вых}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^{п} \ln \frac{T_{вых}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^{п}} \ln \frac{\rho_{вых}^{п} p_{s_{вых}} v_{вых}^{п} W_{вых}^{п}}{\rho_0^{п} p_{s_0} v_0^{п} \varphi_0 (1 + W_{вых}^{п})} \right) \right] + \\ & + G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^{п} (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^{п} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^{п}} \ln \frac{\rho_{вх}^{п} p_{s_{вх}} v_{вх}^{п} W_{вх}^{п}}{\rho_0^{п} p_{s_0} v_0^{п} \varphi_0 (1 + W_{вх}^{п})} \right) \right] - \\ & \left. - G^{вод} \left[(i_{вых}^{вод} - i_{вх}^{вод}) - T_0 (s_{вых}^{вод} - s_{вх}^{вод}) \right] \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Для воздухоподогревателя:

$$\varepsilon = 1 / Q \left\{ G^{дг} \left[c_p^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_p^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{s_{вх}} \varphi_{вх}^{дг}}{p_{вых}^{дг} - p_{s_{вых}} \varphi_{вых}^{дг}} \right) \right] - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^n (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вх}^n p_{с_{вх}} v_{вх}'' W_{вх}}{\rho_0^n p_{с_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вх})} \right) \right] + \\
 & + G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^n (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вх}^n p_{с_{вх}} v_{вх}'' W_{вх}}{\rho_0^n p_{с_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вх})} \right) \right] - \\
 & - G^{вo3} \left[c_p^{вo3} (T_{вх}^{вo3} - T_{вх}^{вo3}) - T_0 \left(c_p^{вo3} \ln \frac{T_{вх}^{вo3}}{T_{вх}^{вo3}} - \frac{R}{\mu^{вo3}} \ln \frac{p_{вх}^{вo3}}{p_{вх}^{вo3}} \right) \right] \}. \tag{3}
 \end{aligned}$$

Полученные с помощью методов планирования эксперимента и соотношений (1)-(3) функциональные зависимости критериев эффективности от некоторых режимных параметров водоподогревателя и воздухоподогревателя позволяют исследовать закономерности влияния этих параметров на эксергетическую эффективность теплоутилизаторов и оптимизировать эти параметры. Такими параметрами в данной работе были начальное $W_{вх}^{дг}$ и конечное $W_{вх}^{дг}$ влагосодержания дымовых газов, а также отношения чисел Рейнольдса теплоносителей $Re^{дг}/Re^{вод}$ и $Re^{дг}/Re^{возд}$. В качестве примера приведена полученная для воздухоподогревателя зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от указанных параметров, на основании которой определялись их оптимальные значения:

$$\begin{aligned}
 k_{ex}^r = & 3,52 - 44,81 W_{вх}^{дг} + 179,32 W_{вх}^{дг\ 2} + 1,79 W_{вх}^{дг} - \\
 & - 145,01 W_{вх}^{дг} W_{вх}^{дг} + 205,73 W_{вх}^{дг\ 2} - 0,90 Re^{дг}/Re^{вод} + \\
 & + 5,85 W_{вх}^{дг} Re^{дг}/Re^{возд} - 1,22 W_{вх}^{дг} Re^{дг}/Re^{возд} + \\
 & + 0,08 Re^{дг}/Re^{возд\ 2}.
 \end{aligned}$$

Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 3-8. Как видно из графиков на рисунках 3-5, для водоподогревателя значения тепло-эксергетического критерия эффективности в заданных интервалах значений начального влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса дымовых газов и воды имеют минимум при $W_{вх}^{дг} = 0,13$ кг/кг с.г. и $Re^{дг}/Re^{вод} = 0,94$. Для конечного

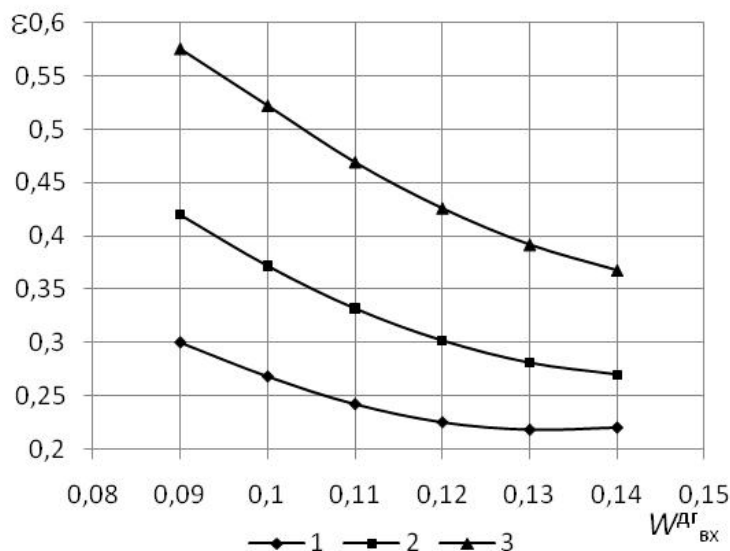


Рис. 3. Зависимость тепло-эксергетического критерия эффективности от начального влагосодержания дымовых газов для водоподогревателя при $Re^{дг}/Re^{вод} = 0,94$: 1 - $W_{вх}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.; 2 - 0,06; 3 - 0,08.

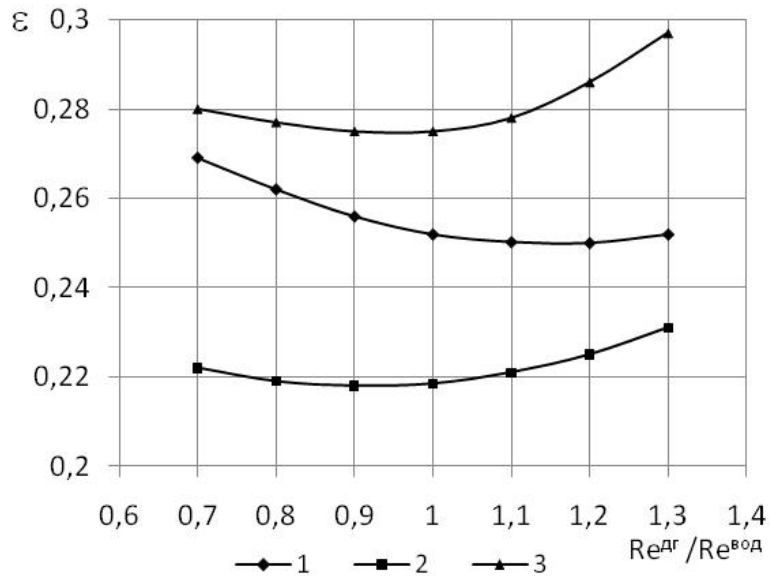


Рис. 4. Зависимость тепло-энергетического критерия эффективности от отношения чисел Рейнольдса дымовых газов и воды для водоподогревателя при $W_{\text{ВЫХ}}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.: 1 – $W_{\text{ВХ}}^{дг} = 0,16$ кг/кг с.г.; 2 – 0,13; 3 – 0,10.

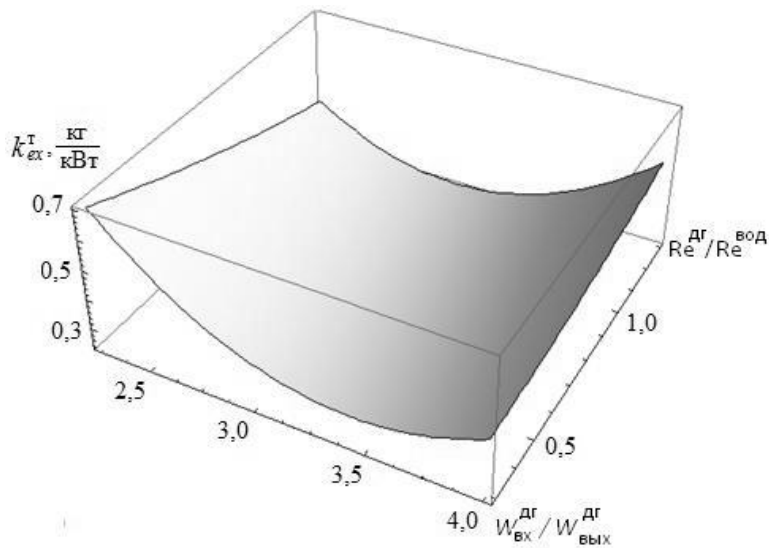


Рис. 5. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для водоподогревателя при $W_{\text{ВЫХ}}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.

влагосодержаия наименьшее значение тепло-энергетического критерия соответствует нижней границе интервала значений влагосодержания при $W_{\text{ВЫХ}}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г. Указанные оптимальные значения параметров обеспечивают максимальную эффективность водоподогревателя.

При использовании в качестве целевой функции оптимизации эксерго-технологиче-

ского критерия эффективности оптимальные значения начального и конечного влагосодержания остаются такими же, как и в предыдущем случае, а оптимальное значение $Re^{дг}/Re^{вод}$ смещается в сторону больших значений и составляет $(Re^{дг}/Re^{вод})_{\text{опт}} = 1,20$. Это обусловлено тем, что эксерго-технологический критерий включает показатель удельной металлоемкости

m/Q , который уменьшается более значительно с увеличением Q и соответственно с ростом $Re^{дг}/Re^{вод}$.

Результаты исследований эксергетической эффективности воздухоподогревателя показали, что при использовании в качестве целевых функций как тепло-эксергетического, так и эксерго-технологического критериев эффективности, минимум значений критериев эффективности, т.е. максимальная эксергетическая эффектив-

ность, наблюдается при $W_{вых}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.

Для рассмотренной ситуации в случае больших значений отношения чисел $Re^{дг}/Re^{возд}$ максимальная эффективность воздухоподогревателя достигается при небольших величинах начального влагосодержания $W_{вх}^{дг}$, что объясняется преобладающим возрастанием теплопроизводительности воздухоподогревателя Q за счет относительного увеличения скорости дымовых газов.

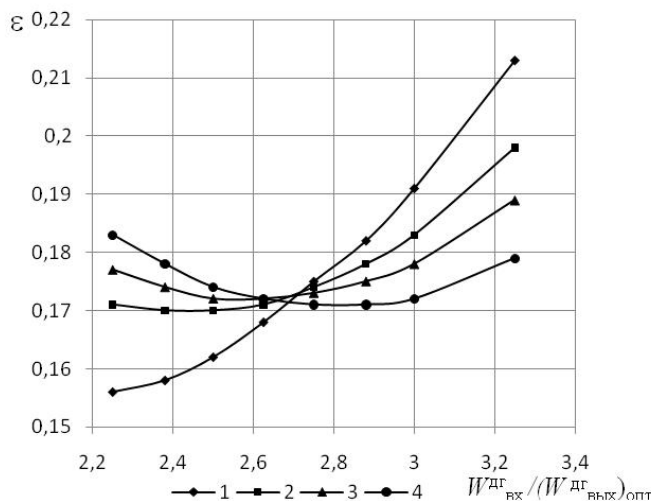


Рис. 6. Зависимость тепло-эксергетического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.; 1 – $Re^{дг}/Re^{возд} = 1,20$; 2 – $1,00$; 3 – $0,90$; 4 – $0,80$.

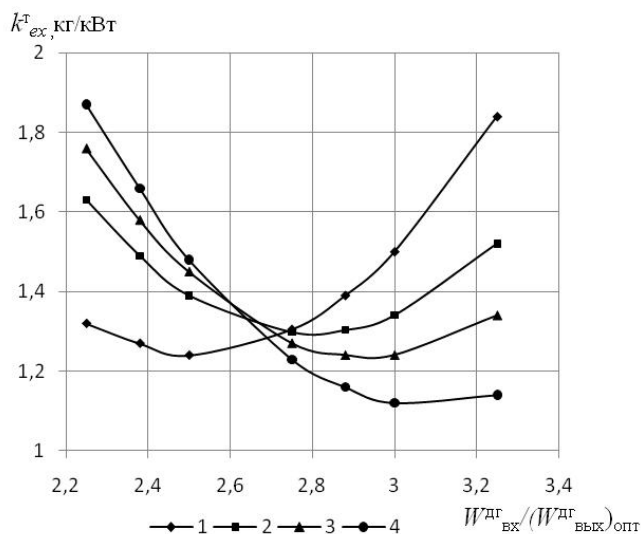


Рис. 7. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.; 1 – $Re^{дг}/Re^{возд} = 1,20$; 2 – $1,00$; 3 – $0,90$; 4 – $0,80$.

В случае же уменьшения значения $Re^{дг}/Re^{вод}$ минимумы эксергетических критериев ε и k_{ex}^T сдвигаются в сторону возрастания величины $W_{вх}^{дг}$, при

этом увеличение Q происходит преимущественно за счет увеличения разности влажностей на входе и выходе воздухоподогревателя.

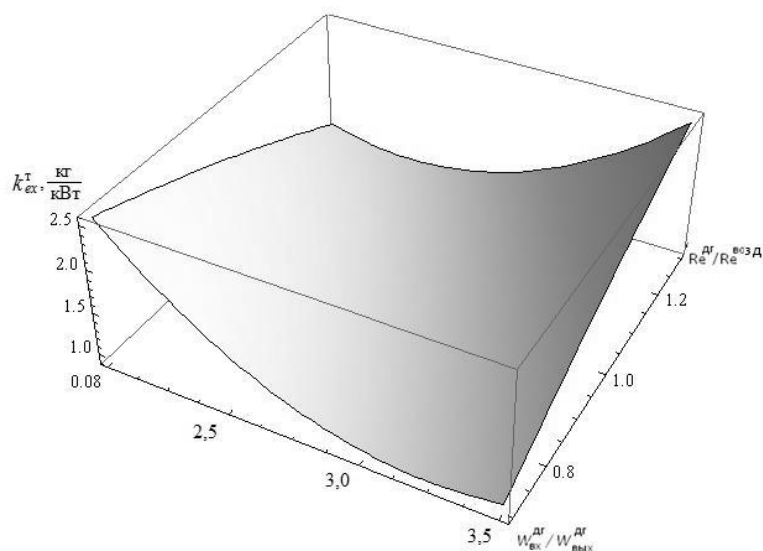


Рис. 8. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влажностей дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.

Результаты оптимизации водо-и воздухогрейного теплоутилизаторов представлены в таблицах 1, 2.

Табл. 1. Оптимальные параметры водогрейного теплоутилизатора

Целевая функция	Водоподогреватель			
	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Оптимальные значения критерия эффективности
ε	0,13	0,04	0,94	0,218
k_{ex}^T	0,13	0,04	1,20	0,25

Табл. 2. Оптимальные параметры воздухогрейного теплоутилизатора

Целевая функция	Воздухоподогреватель							
	Интервал изменения $W_{вх}^{дг} / W_{вых}^{дг}$							
	2,25...2,75				2,75...3,25			
	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Опт.знач. критерия	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Опт.знач. критерия
ε	0,09	0,04	1,20	0,156	0,12	0,04	0,80	0,171
k_{ex}^T	0,10	0,04	1,20	1,24	0,12	0,04	0,80	1,12

Сравнительный анализ эффективности оптимизированных теплоутилизаторов показал, что термодинамическая эффективность, которая характеризуется тепло-эксергетическим критерием ε , выше для воздухоподогревателя, тогда как эксергетическая эффективность, характеризующаяся эксерго-технологическим критерием k_{ex}^T , который учитывает теплотехнические и технологические параметры воздухоподогревателя, выше для водоподогревателя.

Выводы

1. Проведены оптимизация и анализ эффективности конденсационных теплоутилизаторов: водоподогревателя и воздухоподогревателя, предназначенных для подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата.

2. С помощью методов планирования эксперимента получены функциональные зависимости, позволяющие исследовать закономерности влияния некоторых режимных параметров исследуемых теплоутилизаторов на их эксергетическую эффективность и определить оптимальные значения этих параметров.

3. Установлены закономерности влияния начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей на эксергетическую эффективность теплоутилизаторов.

4. Получены оптимальные значения режимных параметров теплоутилизаторов,

которые позволяют увеличить их эффективность до 2,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эксергетический* расчет технических систем. Справочное пособие. Под ред. Долинского А.А.: Наукова Думка. – 1991. – 360 с.

2. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В.* Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами. // *Промышленная теплотехника*. – 2014. – Т. 36, №1. – С. 41-47.

3. *Бойко А.В., Говорущенко Ю.Р., Усатый А.П., Руденко А.С.* Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин с учетом режимов эксплуатации. // *Тяжелое машиностроение*. – 2009, №9. – С. 11-15.

4. *Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Степанова А.И., Пресич Г.А., Шеренковский Ю.В., Гнедаш Г.А.* Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата // *Промышленная теплотехника*. – 2015. – Т.37, № 4. – С.71-79.

5. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

6. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Новаковский М.А.* Эксерго-технологическая эффективность газовоздушных теплоутилизаторов энергетических установок. // *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, №3. – С.42-49.

EFFICIENCY OF ELEMENTS OF COMBINED HEATUTILISATION SYSTEM FOR HEATING OF WATER AND COMBUSTION AIR

Fialko N., Navrodska R., Stepanova A., Gnedash G.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

There are exposed results of analysis for efficiency and optimization of structural and working parameters of some elements contained in combined thermoutilizing device used for heating of of water and blast air without of moistening. The solution of general problem obtained by the method of multilevel optimization is presented. It takes into account the change of content the smoke gases and air.

References 6, tables 2, figures 8.

Key words: thermoutilizers, optimizing, exergetic analysis, criteria of efficiency.

1. *Exergy* calculanion of technical systems.

Reference book. Edited by Dolinsky A. Kyiv: "Naukova dumka". – 1991. – 360 p.

2. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky J.* Efficiency for thermoutilizing systems of boiler plants, for optimization of method of different types // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2014. – V. 36 , № 1. – P. 41-47. (Rus.).

3. *Boiko A., Govorutchenko J., Usatu A., Rudenko A.* Methodology and alhorithm of optimithation of turbine setting with taking into account the condition of use // *Tiageloe maghinostroenie.* – 2009, №9. – P. 11-15. (Rus.).

4. *Fialko N., Navrodska R., Stepanova A., Presich G., Sherenkovsky J., Gnedash G.* The efficiency analsis of heat utilization instalasion for heating and humidifying of combustion air of boiler plant // *Promyshlennaya teplotekhnika.* 2015. – V.37, №4. – P. 71-79. (Rus.).

5. *Nalimov V.* Theory of experiment. – M.: Nauka, 1971. – 207 p.

6. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky J.* Exergy and technological efficiency of gas-air heat recovery units of power plants // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2011. – V.33, № 3. – P.42-49. (Rus.)

Получено 18.03.2015

Received 18.03.2015