

УДК 621.036.7

Фиалко Н.М.^{1,2}, Степанова А.И.¹, Пресич Г.А.¹, Навродская Р.А.¹, Шеренковский Ю.В.¹,
Малецкая О.Е.¹, Гнедаш Г.А.¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Национальный технический университет Украины «КПИ»

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Викладено результати термодинамічної оптимізації і порівняльного аналізу ефективності теплоутилізаційних систем котельних агрегатів. Наведено дані щодо оцінки ступеня ефективності використання теплових насосів в різних системах утилізації теплоти відхідних газів котельного агрегату.

Изложены результаты термодинамической оптимизации и сравнительного анализа эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов. Приведены данные по оценке степени эффективности использования тепловых насосов в различных системах утилизации теплоты уходящих газов котельного агрегата.

The results of thermodynamic optimization and comparative analysis of efficiency of thermo recycling systems are considered. The estimation of efficiency of several different exhaust gases thermo recycling systems is presented.

b – толщина ребра;
 c_p – удельная изобарная теплоемкость;
 d – влагосодержание дымовых газов;
 E – эксергетическая мощность;
 G – массовый расход теплоносителя;
 h – высота ребра;
 i – энтальпия;
 m – масса;
 N – мощность;
 n – количество элементов в системе;
 n_1 – количество источников мощности в системе;
 p – давление;
 Q – тепловая мощность;
 R – газовая постоянная;
 S – межреберный шаг;
 s – энтропия;

T – температура;
 Δ – изменение величины;
 μ – молекулярная масса.

Индексы верхние:

дг – дымовые газы;
 вод – вода;
 воз – воздух;
 внут – внутренний параметр;
 ф – фреон.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной параметры;
 о – окружающая среда;
 п – пар;
 парц – парциальное;
 пот – потери;
 ср – среднее значение параметра.

Разработка энерготехнологических процессов и установок должна включать не только оценку их эффективности, но и общую технико-экономическую оптимизацию [1-3]. На стадии разработки технических решений установок важной составляющей такой оптимизации является термодинамическая оптимизация, входящая в качестве необходимого этапа в методику комплексного анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем [4-6]. В число основных задач термо-

динамической оптимизации входят выбор критериев оценки термодинамической эффективности системы, которые могли бы служить целевыми функциями оптимизации, выбор методов исследования и оптимизации. Для простых термодинамических систем методы термодинамической оптимизации, как правило, включают определение функциональных зависимостей выбранных критериев эффективности от основных параметров системы. Если такие зависимости установлены для кон-

кретной термодинамической системы или для определенного типа систем, оптимизация проводится с помощью известных математических методов. Но для сложных термодинамических систем, состоящих из большого числа элементов, установить функциональные зависимости критериев эффективности от параметров всех элементов не представляется возможным. В таких случаях задачи оптимизации можно решать с помощью вариантного, структурного или структурно-вариантного методов, основанных на эксергетическом подходе [7].

Целью работы является термодинамическая оптимизация и сравнительный анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов на основе структурно-вариантного метода оптимизации и методики комплексного анализа эффективности.

В работе рассмотрены системы утилизации теплоты уходящих газов водогрейных котельных агрегатов, предназначенные для подогрева обратной теплосетевой воды, а также для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды [8]. Рассматривалось два случая реализации технических решений теплоутилизационных систем: без использования теплового насоса (ТН) и с его использованием. В соответствии с основными термодинамическими положениями указанных методов для решения оптимизационных задач и сравнительного анализа эффективности исследуемых теплоутилизационных систем последовательно реализованы следующие этапы.

Предложены критерии оценки термодинамической эффективности теплоутилизационных систем, которые могут служить целевыми функциями оптимизации.

- Выбран метод исследований и на его основе определены зависимости критериев эффективности от начальных и конечных параметров теплоутилизационных систем.
- Выбран метод оптимизации, в соответствии с которым сложные системы представлены в виде ряда дискретных взаимосвязанных эксергетическими потоками элементов более про-

стой структуры.

- Выполнены тепловые и эксергетические расчеты, позволившие из ряда элементов простой структуры выбрать группу элементов, изменение эксергетических потерь в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности теплоутилизационной системы в целом.
- Проведена оптимизация указанных элементов, после чего элементы с оптимальными параметрами введены в качестве составляющих в теплоутилизационные системы.
- Для теплоутилизационных систем с оптимизированными элементами определены критерии эффективности и на их основе проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности систем различного назначения.

В качестве критериев оценки термодинамической эффективности теплоутилизационных систем и их отдельных элементов были выбраны различные критерии, каждый из которых использовался на определенном этапе исследований. На первом этапе – это критерий эффективности ε [4-6], представляющий собой удельную характеристику системы: величину потерь эксергетической мощности на единицу снимаемой тепловой мощности, а также разностный эксергетический КПД η_{ex} :

$$\varepsilon = E_{\text{пот}}^{\text{внут}}/Q, \quad \eta_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i'}{\sum_{i=1}^n \Delta E_i''}, \quad (1)$$

где $\Delta E_i''$ – уменьшение расходуемой эксергии, $\Delta E_i'$ – возрастание получаемой эксергии.

В качестве метода исследований использовался интегральный балансовый метод эксергетического анализа, в рамках которого для предложенных теплоутилизационных систем были составлены системы балансовых уравнений: эксергетических, тепловых и материальных. Рассматривалось три случая:

- влагосодержанием дымовых газов и воздуха можно пренебречь;
- влагосодержание дымовых газов и воздуха остается постоянным;
- влагосодержание дымовых газов и воздуха

после прохождения теплоутилизационной системы или ее отдельного элемента изменяется в связи с конденсацией присутствующего в них водяного пара.

Система уравнений, объединяющая указанные три случая, для теплоутилизационной системы, предназначенной для подогрева обратной теплосетевой воды, имеет следующий вид:

$$\sum_{j=1}^{n_1} N_j + E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} + E_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ПОТ}}^{\text{ВНУТ}} = 0;$$

$$G^{\text{ДГ}} i^{\text{ДГ}} - G^{\text{ВОД}} i^{\text{ВОД}} = 0;$$

$$\sum_{j=1}^n G_{j_{\text{ВХ}}} - \sum_{j=1}^n G_{j_{\text{ВЫХ}}} = \text{const},$$

$$G^{\text{ДГ}} c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - \bar{k}^{\text{ДГ}} \overline{\Delta T F}_{\text{П}} = 0;$$

$$G^{\text{ВОД}} c_{\text{рсп}}^{\text{ВОД}} (T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - T_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - \bar{k}^{\text{ВОД}} \overline{\Delta T F}_{\text{ТР}}^{\text{ВНУТ}} = 0;$$

$$E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} = G^{\text{ДГ}} \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} \right) \right];$$

$$E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} = G^{\text{ДГ}} \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВХ}})}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВЫХ}})} \right) \right] - G^{\text{ДГ}} d / Q \left[(i_{\text{ПВЫХ}} - i_{\text{ПВХ}}) - T_0 (s_{\text{ПВЫХ}} - s_{\text{ПВХ}}) \right];$$

$$E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} = G^{\text{ДГ}} \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВХ}})}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВЫХ}})} \right) \right] - G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВЫХ}} \left[(i_{\text{ПВЫХ}} - i_{\text{П0}}) - T_0 (s_{\text{ПВЫХ}} - s_{\text{П}}) \right] + G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВХ}} \left[(i_{\text{ПВХ}} - i_{\text{П0}}) - T_0 (s_{\text{ПВХ}} - s_{\text{П}}) \right];$$

$$E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}} = G^{\text{ВОД}} \left[(i_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right].$$

Из систем балансовых уравнений определены зависимости внутренних эксергетических

потерь $E_{\text{ПОТ}}^{\text{ВНУТ}}$ (деструкции), разностного эксергетического КПД η_{ex} и критерия эффективности ε от начальных и конечных параметров теплоутилизационных систем:

$$E_{\text{ПОТ}}^{\text{ВНУТ}} = (E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}) - (E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}});$$

$$\eta_{\text{ex}} = (E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) / (E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}). \quad (3)$$

Зависимости ε от начальных и конечных параметров для теплоутилизационной системы, предназначенной для подогрева обратной теплосетевой воды, в указанных трех случаях имеют следующий вид:

• Влажностью дымовых газов можно пренебречь:

$$\varepsilon = G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} \right) \right] - G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right]. \quad (4)$$

• Влажностью дымовых газов остается постоянным:

$$\varepsilon = G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВХ}})}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВЫХ}})} \right) \right] - G^{\text{ДГ}} d / Q \left[(i_{\text{ПВЫХ}} - i_{\text{ПВХ}}) - T_0 (s_{\text{ПВЫХ}} - s_{\text{ПВХ}}) \right] - G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right]. \quad (5)$$

• Влажностью дымовых газов изменяется:

$$\varepsilon = G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВХ}})}{p_{\text{ВЫХ}}^{\text{ДГ}} - p_{\text{парц}}(T_{\text{ВЫХ}})} \right) \right] - G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВЫХ}} \left[(i_{\text{ПВЫХ}} - i_{\text{П0}}) - T_0 (s_{\text{ПВЫХ}} - s_{\text{П0}}) \right] + G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВХ}} \left[(i_{\text{ПВХ}} - i_{\text{П0}}) - T_0 (s_{\text{ПВХ}} - s_{\text{П0}}) \right] - G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right]. \quad (6)$$

Соответствующие соотношения, полученные из системы эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений, для теплоутилизационной системы, предназначенной для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды, име-

ют следующий вид:

- Влажностью дымовых газов и воздуха можно пренебречь:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & G^{дг} \left[c_{рсп}^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_{рсп}^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг}}{p_{вых}^{дг}} \right) \right] - G^{в03} \left[c_{рсп}^{в03} (T_{вх}^{в03} - T_{вых}^{в03}) - \right. \\ & \left. - T_0 \left(c_{рсп}^{в03} \ln \frac{T_{вх}^{в03}}{T_{вых}^{в03}} - \frac{R}{\mu^{в03}} \ln \frac{p_{вх}^{в03}}{p_{вых}^{в03}} \right) \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

- Влажностью дымовых газов и воздуха остается постоянным:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & G^{дг} \left[c_{рсп}^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_{рсп}^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{парц}(T_{вх})}{p_{вых}^{дг} - p_{парц}(T_{вых})} \right) \right] + \\ & + G^{дг} d / Q \left[(i_{пвх} - i_{пвых}) - T_0 (s_{пвх} - s_{пвых}) \right] - \\ & - G^{в03} \left[c_{рсп}^{в03} (T_{вх}^{в03} - T_{вых}^{в03}) - T_0 \left(c_{рсп}^{в03} \ln \frac{T_{вх}^{в03}}{T_{вых}^{в03}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{R}{\mu^{в03}} \ln \frac{p_{вх}^{в03} - p_{парц}(T_{вх})}{p_{вых}^{в03} - p_{парц}(T_{вых})} \right) \right] + \\ & + G^{в03} d / Q \left[(i_{пвх} - i_{пвых}) - T_0 (s_{пвх} - s_{пвых}) \right]; \end{aligned} \quad (8)$$

- Влажностью дымовых газов и воздуха изменяется:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & G^{дг} \left[c_{рсп}^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_{рсп}^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{парц}(T_{вх})}{p_{вых}^{дг} - p_{парц}(T_{вых})} \right) \right] + G^{дг} d_{вх} \left[(i_{пвх} - i_{п0}) - \right. \\ & \left. - T_0 (s_{пвх} - s_{п0}) \right] - G^{дг} d_{вых} \left[(i_{пвых} - i_{п0}) - \right. \\ & \left. - T_0 (s_{пвых} - s_{п0}) \right] - G^{в03} \left[c_{рсп}^{в03} (T_{вх}^{в03} - T_{вых}^{в03}) - \right. \\ & \left. - T_0 \left(c_{рсп}^{в03} \ln \frac{T_{вх}^{в03}}{T_{вых}^{в03}} - \frac{R}{\mu^{в03}} \ln \frac{p_{вх}^{в03} - p_{парц}(T_{вх})}{p_{вых}^{в03} - p_{парц}(T_{вых})} \right) \right] + \\ & + G^{в03} d_{вх} \left[(i_{пвх} - i_{п0}) - T_0 (s_{пвх} - s_{п0}) \right] - \\ & - G^{в03} d_{вых} \left[(i_{пвых} - i_{п0}) - T_0 (s_{пвых} - s_{п0}) \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

Ввиду сложности рассматриваемых теплоутилизационных систем установить необходимые для решения оптимизационных задач функциональные зависимости критериев эффективности от параметров всех входящих в систему элементов не представляется возможным. Поэтому в качестве метода оптимизации использовался структурно-вариантный метод эксергетического анализа, позволяющий оптимизировать систему путем оптимизации ее отдельных элементов. В соответствии с основными термодинамическими положениями структурно-вариантного метода рассматриваемые теплоутилизационные системы представлены в виде ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов более простой структуры, внутренние процессы в которых не рассматриваются, а во внимание принимаются только свойства, определяющие материальное и энергетическое взаимодействие их с остальными элементами теплоутилизационной системы. На рис. 1 в качестве примера представлена принципиальная схема котельной установки с теплоутилизационной системой, предназначенной для подогрева обратной теплосетевой воды, с обозначением эксергетических потоков между элементами системы.

В общем случае такое моделирование можно осуществить тем или иным способом в зависимости от структурной организации термодинамической системы, например, с последовательным или параллельным соединением элементов, не имеющих никаких дополнительных связей между собой. В рамках эксергетического анализа возможность применения дискретно-элементного модульного принципа с последующей координацией модулей при их объединении в единую систему посредством учета причинно-следственных отношений между отдельными явлениями и эффектами обусловлена основными характеристиками, отражающими сущность эксергетических понятий: аддитивностью и универсальностью.

В сложной термодинамической системе всегда существует элемент или набор элемен-

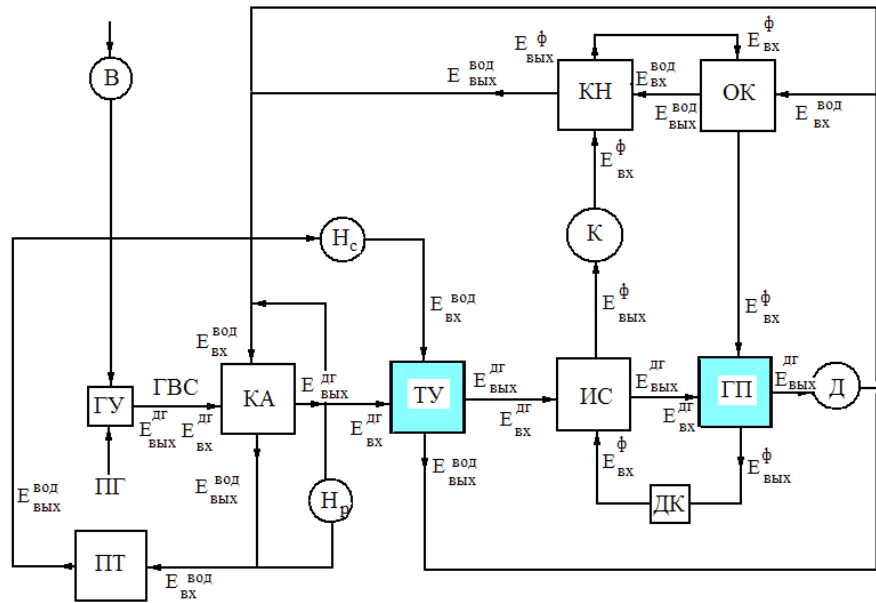


Рис. 1. Принципиальная схема котельной установки с теплоутилизационной системой, предназначенной для подогрева обратной теплосетевой воды: В – вентилятор; ГУ – горелочное устройство; ПТ – потребитель теплоты; КА – котлоагрегат; НС – насос сетевой; НР – насос рециркуляционный; ТУ – теплоутилизатор; ИС – испаритель; К – компрессор; КН – конденсатор; ОК – водогрейный охладитель конденсата рабочего вещества теплового насоса; ГП – газоподогреватель; ДК – дроссельный клапан; Д – дымосос.

тов, изменение эксергетических потерь в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности системы в целом. Целесообразно выделить такие элементы в исследуемых теплоутилизационных системах. С этой целью проведены тепловые и эксергетические расчеты изменения эксергетических потерь в теплоутилизационных системах при изменении эксергетических потерь в каждом отдельном элементе системы. Эти расчеты позволили выделить два элемента – теплоутилизатор (ТУ) и газоподогреватель (ГП), изменение эксергетических потерь в которых наиболее сильно влияет на изменение эффективности систем в целом. Проведена оптимизация указанных элементов теплоутилизационных систем. Необходимые для решения оптимизационных задач функциональные зависимости критериев эффективности от основных параметров теплоутилизатора и газоподогревателя получены с использованием статистических

методов планирования эксперимента [9, 10]. На этом этапе исследований в качестве целевых функций оптимизации использовались критерии эффективности:

$$k_{ex}^T = E_{пот}^{внут} \cdot m / Q^2, \quad \varepsilon = E_{пот}^{внут} / Q. \quad (10)$$

В качестве варьируемых характеристик выбраны геометрические параметры ребренных поверхностей теплообмена теплоутилизатора и газоподогревателя: высота ребра h , толщина ребра b и межреберный шаг S . В рамках указанных методов для построения матриц планирования в каждом случае был реализован ортогональный центральный композиционный план. В табл. 1 приведены условия проведения экспериментов с указанием интервалов изменения геометрических параметров (уровней варьирования).

В качестве примера приведены полученные функциональные зависимости для водогазового газоподогревателя:

$$k_{ex}^T = 6,61 \cdot 10^{-3}h^2 + 1,11 \cdot 10^{-2}b^2 + 3,07 \cdot 10^{-4}S^2 + 8,96 \times 10^{-3}hb + 2,83 \cdot 10^{-4}hS + 5,55 \cdot 10^{-3}bS - 1,29 \cdot 10^{-4}h - 3,42 \cdot 10^{-2}b + 1,48 \cdot 10^{-2}S + 5,09 \cdot 10^{-2};$$

$$\varepsilon = -1,34 \cdot 10^{-4}h^2 + 3,06 \cdot 10^{-4}b^2 - 3,12 \cdot 10^{-4}S^2 - 1,2 \times 10^{-4}hb + 5,65 \cdot 10^{-5}hS - 2,78 \cdot 10^{-4}bS - 2,7 \cdot 10^{-3}h - 3,74 \cdot 10^{-3}b + 7,46 \cdot 10^{-3}S + 5,44 \cdot 10^{-2}.$$

На рис. 2 представлены зависимости критерия эффективности k_{ex}^T от геометрических параметров оребренной теплообменной поверхности теплоутилизатора.

Минимизация полученных функциональных зависимостей для критериев эффективности k_{ex}^T и ε позволила определить области оптимальных значений параметров теплообменной поверхности теплоутилизатора и газо-

подогревателя (табл. 2). Теплоутилизатор и газоподогреватель с оптимальными параметрами оребренной поверхности ($TU_{опт}$ и $ГП_{опт}$) введены в качестве составляющих элементов в предложенные теплоутилизационные системы, что позволило увеличить эффективность теплоутилизационных систем в среднем на 3...4 %.

Для теплоутилизационных систем с оптимизированными элементами на основе соотношений (1) – (10) определены критерии эффективности и проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности (табл. 3). Здесь 1 – теплоутилизационная система, предназначенная для подогрева обратной теплосетевой воды, 2 – теплоутилизационная система,

Табл. 1. Условия проведения экспериментов

Фактор		h, мм		b, мм		S, мм	
		TU	ГП	TU	ГП	TU	ГП
Основной уровень	x_{i_0}	10,0	9,5	0,6	1,0	5,0	4,8
Верхний уровень	x_i^B	17,0	12,0	0,8	1,5	7,0	7,0
Нижний уровень	x_i^H	3,0	7,0	0,4	0,5	3,0	2,5
Звездные точки	x_i^B	18,5	12,5	0,84	1,6	7,4	7,6
	x_i^H	1,5	6,5	0,36	0,4	2,6	2,0
Интервал варьирования	δ_i	7,0	2,5	0,2	1,0	2,0	2,3

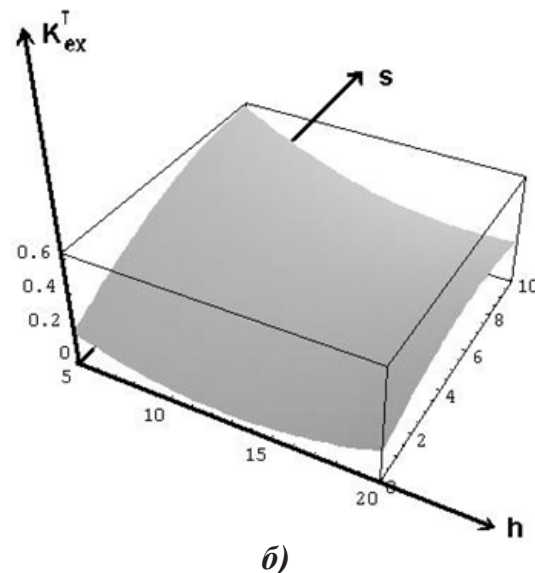
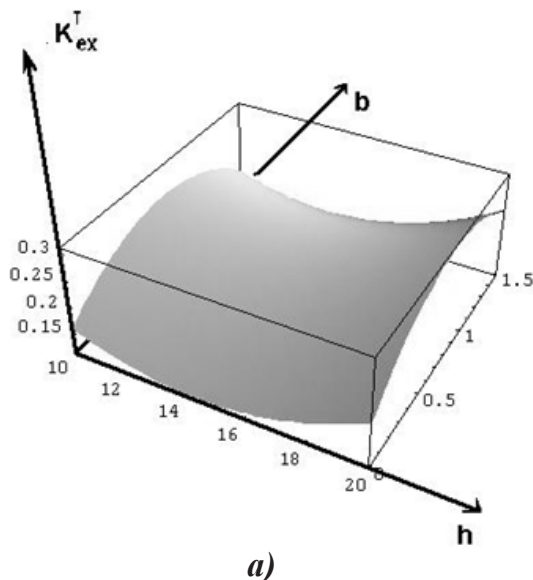


Рис. 2. Зависимости критерия эффективности k_{ex}^T от геометрических параметров оребренной теплообменной поверхности теплоутилизатора: а) $S = 2,8$ мм; б) $b = 0,45$ мм.

Табл. 2. Результаты решения оптимизационной задачи

Параметры	Оптимальные значения	
	Теплоутилизатор	Газоподогреватель
h , мм	12,0...14,0	7,0...9,0
b , мм	0,4...0,5	0,4...0,5
S , мм	2,5...3,0	2,5...3,0
k_{ex}^T , кг/кВт	0,190	0,215
ε	0,062	0,077

Табл. 3. Термодинамическая эффективность теплоутилизационных систем и их отдельных элементов

Теплоутилизационная система		Параметр	N , кВт	Q , кВт	$\Delta E^{дг}$, кВт	$\frac{\Delta E^{вод}}{\Delta E^{воз}}$, кВт	$\Delta E^{внут}$, кВт	ε	η_{ex} , %
		1	С ТН	26,6	326,3	89,6	35,8	80,4	0,246
	Без ТН	113,0	757,2	134,2	80,4	166,7	0,220	32,5	
2	С ТН	7,6	101,8	96,3	22,1	81,8	0,787	21,3	
	Без ТН	158,0	427,9	190,6	86,0	262,6	0,555	24,7	
Отдельные элементы теплоутилизационной системы	ТУ	-	306,8	80,6	29,7	50,9	0,166	36,8	
	ТУ _{опт}	-	306,8	30,4	11,4	19,0	0,062	37,5	
	ГП	-	12,3	0,7	2,1	1,5	0,111	35,2	
	ГП _{опт}	-	12,3	0,5	1,5	0,9	0,077	36,3	

предназначенная для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды.

Результаты проведенной термодинамической оптимизации и сравнительного анализа эффективности теплоутилизационных систем различного назначения можно сформулировать следующим образом:

- Оптимизация отдельных элементов теплоутилизационных систем (теплоутилизатора и газонагревателя) позволила увеличить эффективность теплоутилизационных систем в среднем на 3...4 %.

- Термодинамическая эффективность теплоутилизационной системы для подогрева обратной теплосетевой воды выше эффективности системы для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды в среднем в 2,9 раза как в слу-

чае использования теплового насоса при реализации технического решения, так и без его использования.

- Использование тепловых насосов в комплексной системе утилизации теплоты уходящих газов котлоагрегата повышает термодинамическую эффективность предлагаемых теплоутилизационных систем, при этом эффективность использования тепловых насосов в случае применения теплоутилизационной системы для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды выше, чем в случае применения системы для подогрева обратной теплосетевой воды. Так в первом случае использование тепловых насосов повышает термодинамическую эффективность теплоутилизационной системы на 31 %, а во втором – на 12 %.

Выводы

1. Основные термодинамические положения методики комплексного анализа эффективности теплоутилизационных систем и структурно-вариантного метода термодинамической оптимизации адаптированы к исследованию теплоутилизационных систем сложной структуры.

2. Выполнено моделирование внутренних эксергетических связей теплоутилизационных систем котельных агрегатов, предназначенных для подогрева обратной теплосетевой воды, а также для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды. Теплоутилизационные системы представлены в виде ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов более простой структуры, внутренние процессы в которых не рассматриваются, а во внимание принимаются только свойства, определяющие материальное и энергетическое взаимодействие их с остальными элементами системы.

3. Установлено, что теплоутилизатор и газоподогреватель, которые являются составными элементами теплоутилизационных систем, представляют собой совокупность элементов, изменение эксергетических потерь в которых наиболее существенно сказывается на изменении эффективности систем в целом.

4. Проведена оптимизация указанных элементов на основе использования статистических методов планирования эксперимента. Оптимизированные элементы введены в теплоутилизационные системы, что позволило увеличить их эффективность, в среднем, на 3...4 %.

5. Установлено, что использование тепловых насосов в комплексной системе утилизации теплоты уходящих газов котельного агрегата повышает термодинамическую эффективность системы в случае ее применения для подогрева обратной теплосетевой воды на 12 %, а в случае применения для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и подогрева обратной теплосетевой воды – на 31 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амерханов Р.А., Долинский А.А., Драганов Б.Х.* Основы эксергоэкономического метода оптимизации энергопреобразующих систем // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 1. – С.90 – 101.

2. *Эксергетический метод* и его приложения. Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Издательство «Мир». – 1967. – 247 с.

3. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. – М.: Энергия. – 1968. – 277 с.

4. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А.* Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 5. – С. 22 – 28.

5. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А.* Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 68 – 76.

6. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А.* Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 78 – 85.

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

8. *Фиалко Н.М., Пресіч Г.О., Навродська Р.О., Гнедаш Г.О.* Удосконалення комплексної системи утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів для підігрівання і зволоження дутьевого повітря // Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 5. – С. 88 – 95.

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

10. *Налимов В.В., Голикова Т.И.* Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.

Получено 28.02.2012 г.