

УДК 621.036.7

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ  
СЛОЖНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ЧАСТЬ 1)**

*Н. М. Фиалко, чл.-корр. НАНУ, доктор технических наук, профессор*

*А. И. Степанова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Р. А. Навродская, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

*e-mail: nmfialko@ukr.net*

**Аннотация.** Недостаточный уровень использования в Украине тепловых вторичных энергоресурсов связан, главным образом, с низкой эффективностью теплоутилизационного оборудования. В то же время известно, что Украина обладает необходимым потенциалом для реализации эффективных технологий утилизации теплоты, в связи с чем проблема их разработки и внедрения актуальна как в настоящее время, так и на ближайшую перспективу.

Цель исследований – разработка для сложных теплоутилизационных систем котельных установок эффективных методов оптимизации, основанных на принципах структурно-вариантного подхода.

В соответствии с указанными принципами для различных теплоутилизационных систем котельных установок разработаны структурные схемы, состоящие из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры. Проведен цикл тепловых и эксергетических расчетов, которые позволили определить элементы, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установок в целом.

С помощью балансовых методов эксергетического анализа и статистических методов планирования эксперимента для этих элементов получены функциональные зависимости целевых функций оптимизации от геометрических параметров теплообменной поверхности и определены области их оптимальных значений. Оптимизированные указанным образом элементы введены в общие схемы установок, а оптимальные значения геометрических параметров теплообменной поверхности использованы на следующих этапах оптимизации установок в качестве начальных условий.

**Ключевые слова:** *теплоутилизационная система, методы оптимизации, потери эксергетической мощности*

**Актуальность.** Разработка эффективных энергосберегающих технологий и высокоэкономичного оборудования для энергетических установок различного типа

являются неотъемлемой частью общей проблемы энергосбережения в Украине. Известно, что применение новых высокоэффективных теплоутилизационных систем, например, для газопотребляющих котлов позволяет экономить до 2,5 м<sup>3</sup> природного газа на 1 ГДж выработанной тепловой энергии. Для Украины как энергодефицитной страны, обладающей при этом необходимым потенциалом для реализации эффективных технологий утилизации теплоты, проблема их разработки и внедрения актуальна как в настоящее время, так и на ближайшую перспективу.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Следует отметить, что утилизация теплоты отходящих газов энергетических установок связана с определенными трудностями, которые обусловлены целым рядом особенностей установок и конкретных систем утилизации теплоты. Необходимость оптимизации теплоутилизационных систем, т.е. нахождения таких параметров, которые обеспечивают максимальную эффективность систем, не оставляет сомнений. В качестве оценочных критериев, которые могли бы служить также целевыми функциями оптимизации, для теплоутилизационных систем могут быть использованы эксерго-технологический  $k_{ex}^T = E_{пот} m / Q^2$  и тепло-эксергетический  $\varepsilon = E_{пот} / Q$  критерии оценки эффективности [1-4].

Эффективность теплоутилизационных систем различной степени сложности в значительной степени зависит от выбора метода оптимизации. Это связано с тем, что рациональный выбор методов оптимизации для таких систем позволяет получать и использовать при разработке их конструкции параметры, максимально приближенные к оптимальным, что, в свою очередь, повышает эффективность теплоутилизационной системы.

**Цель исследования** – разработка для сложных теплоутилизационных систем котельных установок эффективных методов оптимизации, основанных на принципах структурно-вариантного подхода.

**Материалы и методы исследования.** Для сложных теплоутилизационных систем, включающих большое количество элементов, при построении математических моделей, необходимых для их оптимизации, не представляется

возможным установить общие аналитические зависимости целевых функций оптимизации от параметров системы. В этих случаях целесообразно разработать для таких систем методы оптимизации, основанные на основных принципах структурно-вариантного подхода к оптимизации и принципах многоуровневой оптимизации [5]. В данной работе на примерах теплоутилизационных систем котельных установок рассмотрены основные этапы разработки для сложных теплоутилизационных систем метода оптимизации, основанного на принципах структурно-вариантного подхода.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Основные принципы используемого в работе структурно-вариантного подхода следующие:

- разработать структурную схему установки, состоящую из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры;
- провести тепловые и эксергетические расчеты для распознавания элементов, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установки в целом;
- оптимизировать выделенные элементы;
- ввести оптимизированные элементы в общие схемы установок;
- использовать на следующих этапах оптимизации полученные значения оптимальных параметров отдельных элементов в качестве начальных условий.

В соответствии с указанными принципами для различных теплоутилизационных систем котельных установок разработаны структурные схемы, состоящие из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры. Свойства этих элементов определяют материальное и энергетическое взаимодействие их с остальными элементами теплоутилизационной системы. В общем случае такое моделирование можно произвести тем или иным способом в зависимости от структурной организации термодинамической системы, например, с последовательным или параллельным соединением элементов. В рамках эксергетического анализа возможность применения дискретно-элементного модульного принципа с последующей координацией модулей при их агрегировании

в единую систему посредством учета причинно-следственных отношений между отдельными явлениями и эффектами, обусловлена основными характеристиками, отражающими сущность эксергетических понятий: аддитивностью и универсальностью.

На рисунках 1-4 приведены структурные схемы установок, включающих котлоагрегат и теплоутилизационные системы с указанием эксергетических потоков между дискретными взаимосвязанными между собой элементами простой структуры.

В сложных термодинамических системах всегда существует элемент или набор элементов, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности системы в целом.

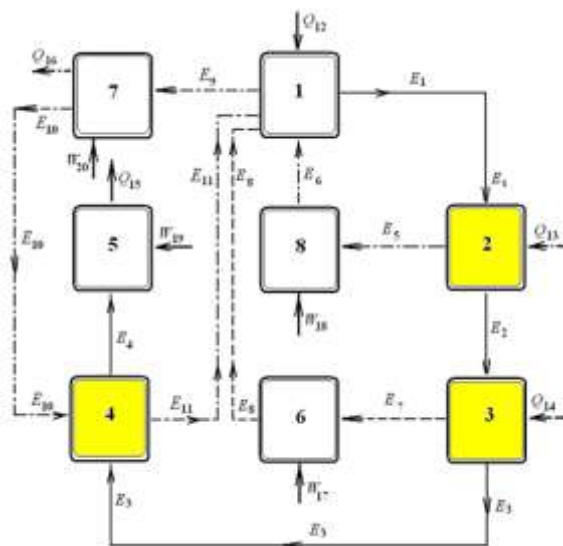
В соответствии с принципами структурно-вариантного метода такие элементы необходимо оптимизировать и ввести в общие схемы установок. Это позволяет более глубоко проанализировать работу установки в целом и повысить точность решения общей оптимизационной задачи, используя на следующих этапах оптимизации в качестве начальных условий уже полученные значения оптимальных параметров отдельных элементов и уточняя эти значения в процессе решения оптимизационной задачи.

Для распознавания таких элементов необходимо проведение цикла тепловых и эксергетических расчетов, которые призваны показать, в какой степени изменение потерь эксергетической мощности в отдельных элементах влияет на изменение эффективности установки в целом. Для представленных схем такие расчеты были проведены, в результате чего определены и на схемах выделены элементы, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установок в целом.

Далее в соответствии с основными принципами структурно-вариантного подхода проведена оптимизация указанных элементов.

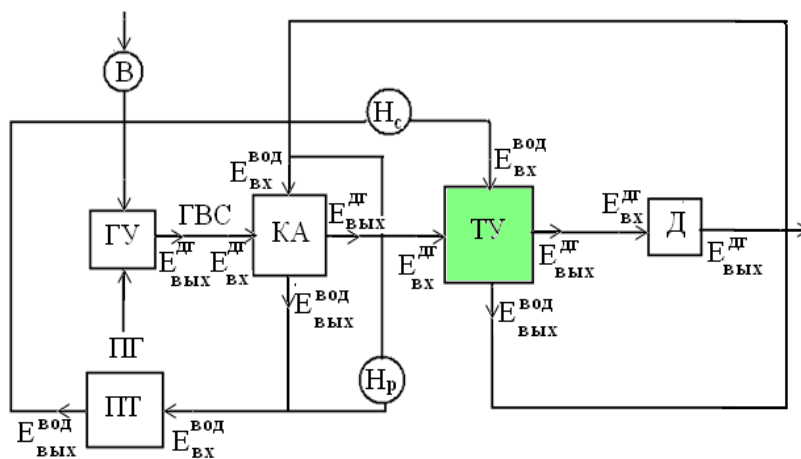
С этой целью с помощью балансовых методов эксергетического анализа и статистических методов планирования эксперимента получены функциональные

зависимости критериев эффективности, которые служили целевыми функциями оптимизации, от параметров указанных элементов.



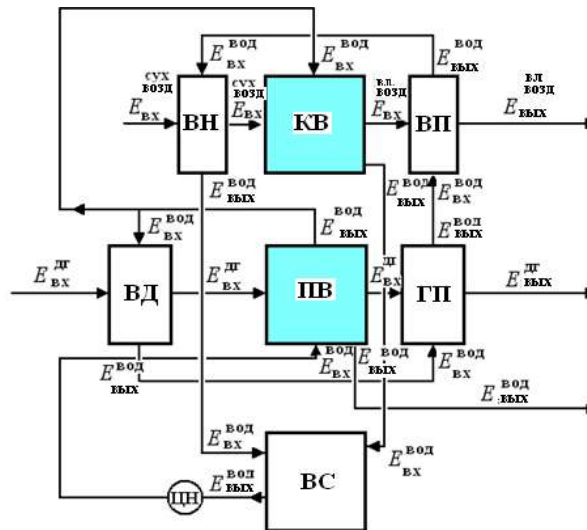
**Рис.1. Структурная схема установки с комбинированной теплоутилизационной системой для подогрева воды и дутьевого воздуха:**

1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 4 – газоподогреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы; — дымовые газы,  $-\cdot-\cdot-$  – воздух, — вода;  $E_1 - E_{11}$  – эксергетические потоки;  $Q_{12} - Q_{16}$  – тепловые потоки;  $W_{17} - W_{20}$  – энергетические потоки



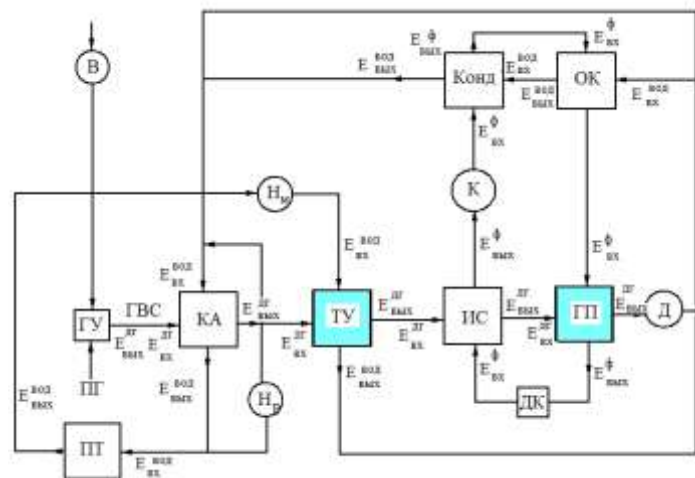
**Рис.2. Структурная схема установки с теплоутилизационной системой для нагрева теплосетевой воды:**

В – вентилятор; ГУ – горелочное устройство; ПГ – природный газ; ПТ – потребитель теплоты; КА – котлоагрегат; Нс – насос сетевой; Нр – насос рециркуляционный; ТУ – теплоутилизатор (водонагреватель); Д – дымосос



**Рис. 3. Структурная схема комбинированной теплоутилизационной установки для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха:**

ВН – воздушнонагреватель; КВ – контактный подогреватель и увлажнитель воздуха; ВП – воздухоподогреватель; ВД – вододогреватель; ПВ – поверхностный водоподогреватель; ГП – газоподогреватель; ВС – водосборник; ЦН – насос



**Рис.4. Структурная схема установки с теплоутилизационной системой для нагрева обратной теплосетевой воды:**

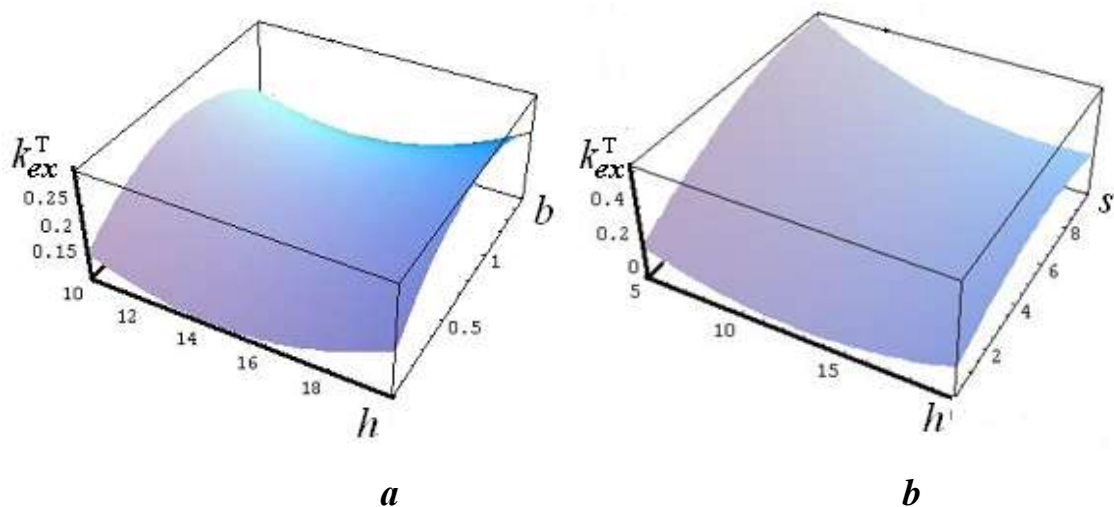
ГУ – горелочное устройство; КА – котлоагрегат; ТУ – водогрейный теплоутилизатор; ИС – испаритель; ГП – газоподогреватель; Конд – конденсатор; ОК – водогрейный охладитель конденсата рабочего вещества теплового насоса; ДК – дроссельный клапан; ПТ – потребитель теплоты; В – вентилятор; НМ, НР – насосы; Д – дымосос

В качестве примера приведены полученные для водогазового газоподогревателя зависимости эксерго-технологического  $k_{ex}^T$  и тепло-эксергетического  $\varepsilon$  критериев эффективности от геометрических параметров оребренной теплообменной поверхности: высоты ребра  $h$ , толщины ребра  $b$  и межреберного шага  $s$ .

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

$$\varepsilon = -1,34 \cdot 10^{-4} h^2 + 3,06 \cdot 10^{-4} b^2 - 3,12 \cdot 10^{-4} s^2 - 1,20 \cdot 10^{-4} hb + 5,65 \cdot 10^{-5} hs - 2,78 \cdot 10^{-4} bs - 2,70 \cdot 10^{-3} h - 3,74 \cdot 10^{-3} b + 7,46 \cdot 10^{-3} s + 5,44 \cdot 10^{-2}.$$

На рис. 5 приведены также графические зависимости критерия эффективности  $k_{ex}^T$  от этих же параметров теплообменной поверхности для водогрейного теплоутилизатора.



**Рис. 5. Зависимости эксерго-технологического критерия эффективности  $k_{ex}^T$  от геометрических параметров оребренной теплообменной поверхности водогрейного теплоутилизатора:**

$$a - s = 2,8 \text{ мм}; b - b = 0,4 \text{ мм}$$

Определены области оптимальных значений геометрических параметров теплообменной поверхности, полученные путем минимизация соответствующих функциональных зависимостей. В таблице представлены результаты решения оптимизационной задачи.

Оптимизированные указанным образом элементы введены в общие схемы установок, а полученные оптимальные значения геометрических параметров теплообменной поверхности использованы на следующих этапах оптимизации в качестве начальных условий.

### **Результаты решения оптимизационной задачи**

Параметры	Области оптимальных параметров	
	Водогрейный 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
$k_{ex}^T$ , кг/кВт	0,190	0,215

### **Выводы**

1. На основе принципов структурно-вариантного подхода разработан метод оптимизации для сложных теплоутилизационных систем котельных агрегатов.

2. В рамках разработанного метода для рассматриваемых теплоутилизационных систем построены структурные схемы с указанием эксергетических потоков между дискретными взаимосвязанными между собой элементами простой структуры.

3. Проведен цикл тепловых и эксергетических расчетов, которые позволили определить элементы, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установок в целом.

4. С помощью балансовых методов эксергетического анализа и статистических методов планирования эксперимента для этих элементов получены



функциональные зависимости целевых функций оптимизации от геометрических параметров теплообменной поверхности и определены области их оптимальных значений.

5. Оптимизированные указанным образом элементы введены в общие схемы установок, а оптимальные значения геометрических параметров теплообменной поверхности использованы на следующих этапах оптимизации в качестве начальных условий.

### **Список литературы**

1. Фиалко Н. М. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, С. И. Шевчук, М. А. Новаковский // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, №4. – С. 78 – 85.
2. Фиалко Н. М. Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационной системы котельных агрегатов / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Г. А. Пресич и др. // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, №2. – С. 59 – 66.
3. Фиалко Н. М. Оптимизация теплоутилизаторов различного типа / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 41, №3. – С.42–49.
4. Фиалко Н. М. Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, Ю. В. Шеренковский // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т.36, №1. – С.41–47.
5. Эксергетический расчет технических систем. Справочное пособие /под ред. А.А. Долинского. – К.: Наукова Думка, 1991. – 360 с.

### **References**

1. Fialko, N. , Sherenkovsky, Yu., Stepanova A., Navrodska, R., Ghevchuk, S., Novakovskiy M. (2009). Effektivnost' sistem utilizatsii teploty otkhodyashchikh gazov steklovarennykh pechey [Efficiency of systems of heat utilizing of end gas in furnase for glass – work]. Promyshlennaya teplotekhnika, 31 (4), 78 – 85.
2. Fialko, N., Sherenkovsky, Yu., Stepanova, A., Presich, G., Navrodska, R., Maletskaya, O., Gnedash, G. (2012). Termodinamicheskaya optimizatsiya i analiz effektivnosti teploutilizatsionnoy sistemy kotel'nykh agregatov [Thedrmodynamical optimization and analysis of efficiency for thermoutilizing systems of boiler plants]. Promyshlennaya teplotekhnika, 34 (2), 59 – 66.
3. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R. (2013). Optimizatsiya teploutilizatorov razlichnogo tipa [Optimization of thermoutilyzers of different types]. Promyshlennaya teplotekhnika, 41 ( 3), 42 –49.

4. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Sherenkovsky, J. (2014). Effektivnost' teploutilizatsionnoy ustanovki dlya kotel'nykh, optimizirovannoy razlichnymi metodami [Efficiency for thermoutilizing systems of boiler plants, for optimization of method of different types]. Promyshlennaya teplotekhnika, 36 (1), 41-47.

5. Eksergeticheskiy raschet tekhnicheskikh sistem. Spravochnoye posobiye [Exergy calculation of technical systems. Reference book]. Edited by A. Dolinsky (1991). Kyiv: Naukova dumka, 360.

## **РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК (ЧАСТИНА 1)**

***Н. М. Фіалко, А. І. Степанова, Р. О. Навродська***

**Анотація.** Недостатній рівень використання в Україні теплових вторинних енергоресурсів пов'язаний, головним чином, з низькою ефективністю тепло утилізаційного обладнання. У той же час відомо, що Україна володіє необхідним потенціалом для реалізації ефективних технологій утилізації теплоти, в зв'язку з чим проблема їх розробки і впровадження актуальна як наданий час, так і на найближчу перспективу.

Мета досліджень - розробка для складних теплоутилізаційних систем котельних установок ефективних методів оптимізації, заснованих на принципах структурно-варіантного підходу.

Відповідно до зазначених принципів для різних теплоутилізаційних систем котельних установок розроблено структурні схеми, які складаються з ряду дискретних взаємопов'язаних потоками ексергії елементів простої структури. Проведено цикл теплових і ексергетичних розрахунків, які дозволили визначити елементи, зміна втрат ексергетичної потужності в яких найбільш суттєво впливає на зміну ефективності установок в цілому.

За допомогою балансових методів ексергетичного аналізу і статистичних методів планування експерименту для цих елементів отримано функціональні залежності цільових функцій оптимізації від геометричних параметрів теплообмінної поверхні і визначено області їх оптимальних значень. Оптимізовані зазначеним чином елементи введено в загальні схеми установок, а оптимальні значення геометричних параметрів теплообмінної поверхні використано на наступних етапах оптимізації установок як початкові умови.

**Ключові слова:** теплоутилізаційна система, методи оптимізації, втрати ексергетичної потужності

## **DEVELOPMENT OF EFFECTIVE METHODS OF OPTIMIZATION COMPLEX HEAT RECOVERY SYSTEMS ENERGY INSTALLATIONS (PART 1)**

***N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska***

**Abstract.** *The insufficient level of utilization of thermal secondary energy resources in Ukraine is mainly due to the low efficiency of heat recovery equipment. At the same time, it is known that Ukraine possesses the necessary potential for the implementation of efficient heat recovery technologies, therefore the problem of their development and implementation is relevant both now and in the near future.*

*The aim of the work is the development of effective optimization methods for complex heat recovery systems of boiler plants based on the principles of the structural-variant approach.*

*In accordance with these principles, structural schemes have been developed for various heat recovery systems of boiler plants, consisting of a number of discrete, interconnected by exergy flows elements of a simple structure. A series of thermal and exergetic calculations was carried out, which made it possible to determine the elements, the change in the losses of exergic power in which most significantly affects the change in the efficiency of the installations as a whole.*

*With the help of balance methods of exergic analysis and statistical methods of experiment planning for these elements, functional dependences of the optimization objective functions on the geometric parameters of the heat exchange surface were obtained and the regions of their optimum values were determined. The elements optimized in this way are introduced into the general schemes of the plants, and the optimum values of the geometric parameters of the heat exchange surface are used in the next stages of plant optimization as initial conditions.*

**Key words:** *heat recovery system, optimization methods, loss of exergy power*