

УДК 621.036.

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ
СЛОЖНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ЧАСТЬ 2)**

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.** Прогрессивно растущие цены на природный газ в Украине обуславливают необходимость внедрения новых энергоэффективных технологий во всех сферах народного хозяйства, в том числе в сфере промышленной и коммунальной теплоэнергетики. В условиях дефицита энергоресурсов энергетика Украины испытывает потребность в высококачественном оборудовании энергетических установок, в том числе теплоутилизационном, разработанном с использованием современных эффективных методов оптимизации. Сказанное определяет актуальность работы. Цель работы – разработка для сложных теплоутилизационных систем котельных установок и стекловаренных печей эффективных методов, основанных на принципах многоуровневой оптимизации.*

В соответствии с указанными принципами многоуровневой оптимизации теплоутилизационные системы стекловаренных печей и котельных установок разделены на несколько уровней оптимизации, разработаны блок-схемы многоуровневой оптимизации и схемы рекурсивного обхода уровней оптимизации, выбраны методы построения математических моделей, рекурсивные целевые функции оптимизации и варьируемые параметры для каждого уровня оптимизации, определены оптимальные параметры систем. Приведены полученные с использованием разработанного метода оптимальные значения режимных и конструкционных параметров для теплоутилизационной системы стекловаренной печи и агрегатированной теплоутилизационной установки для котельных с комбинированным использованием утилизированной теплоты. Сравнительный анализ методов оптимизации показал, что метод, основанный на принципах многоуровневой оптимизации, позволяет оптимизировать большое число параметров, чего не удастся сделать при использовании метода, основанного на принципах структурно-вариантного подхода. Эффективность теплоутилизационных

установок, параметры которых оптимизированы с использованием метода, основанного на принципах многоуровневой оптимизации, на 2-3 % выше эффективности тех же установок, параметры которых оптимизированы с использованием метода, основанного на принципах структурно-вариантного подхода.

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

Актуальность. Проблема разработки и внедрения эффективных технологий утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок является важной составляющей общей проблемы модернизации энергетики Украины. Для многих энергетических установок теплота отходящих газов представляет основную часть потерь теплоты. Так потери теплоты с отходящими газами в котельных агрегатах составляют около 17 %, в промышленных печах – до 25 – 35 %. В условиях дефицита энергоресурсов энергетика Украины испытывает потребность в разработке и внедрении эффективного теплоутилизационного оборудования для таких энергоустановок. Ситуация, которая сложилась в энергетической сфере Украины, определяет актуальность работ, посвященных реализации различных направлений энергосбережения, в том числе направлению, связанному с повышением эффективности технологий утилизации теплоты. В первой части данной работы на основе принципов структурно-вариантного подхода к оптимизации разработан метод оптимизации для сложных теплоутилизационных систем котельных агрегатов. Вторая часть работы посвящена разработке метода оптимизации сложных теплоутилизационных систем энергетических установок на основе принципов многоуровневой оптимизации.

Цель работы – разработка для сложных теплоутилизационных систем котельных установок и стекловаренных печей эффективных методов оптимизации, основанных на принципах многоуровневой оптимизации.

Материалы и методы исследования. В данной работе на примерах трех теплоутилизационных систем: теплоутилизационной системы стекловаренной

печи, предназначенной для предварительного нагрева воздуха, поступающего в регенераторы печи, теплоутилизационной системы для подогрева обратной воды котельных и теплоутилизационной системы для котельной с комбинированным использованием утилизированной теплоты, рассмотрены основные этапы разработки метода оптимизации, основанного на принципах многоуровневой оптимизации.

Результаты исследований и их обсуждение. Основные принципы многоуровневой оптимизации следующие:

- разделить теплоутилизационную систему на несколько уровней оптимизации;
- свести сложную многокритериальную и многопараметрическую оптимизационную задачу к более простым локальным взаимосогласованным оптимизационным задачам каждого уровня;
- при построении математической модели данного уровня использовать в качестве переменных параметров варьируемые параметры объекта данного уровня, а в качестве постоянных – оптимальные параметры, которые являются результатами решения локальных оптимизационных задач других уровней;
- использовать схему рекурсивного обхода уровней оптимизации, которая позволяет осуществлять постоянный информационный обмен между уровнями оптимизации;
- для построенных таким образом математических моделей на каждом уровне оптимизации решить соответствующую оптимизационную задачу и определить оптимальные значения параметров;
- уточнять получаемые оптимальные параметры с помощью дополнительных итераций.

В соответствии с указанными принципами многоуровневой оптимизации для теплоутилизационных систем стекловаренных печей и котельных установок системы разделены на несколько уровней оптимизации, разработаны

блок-схемы многоуровневой оптимизации и схемы рекурсивного обхода уровней оптимизации, выбраны методы построения математических моделей, рекурсивные целевые функции оптимизации и варьируемые параметры для каждого уровня оптимизации, определены оптимальные параметры систем. На рис. 1-3 представлены блок-схемы многоуровневой оптимизации для указанных теплоутилизационных систем. Пунктирными линиями обозначены схемы рекурсивного обхода уровней оптимизации.

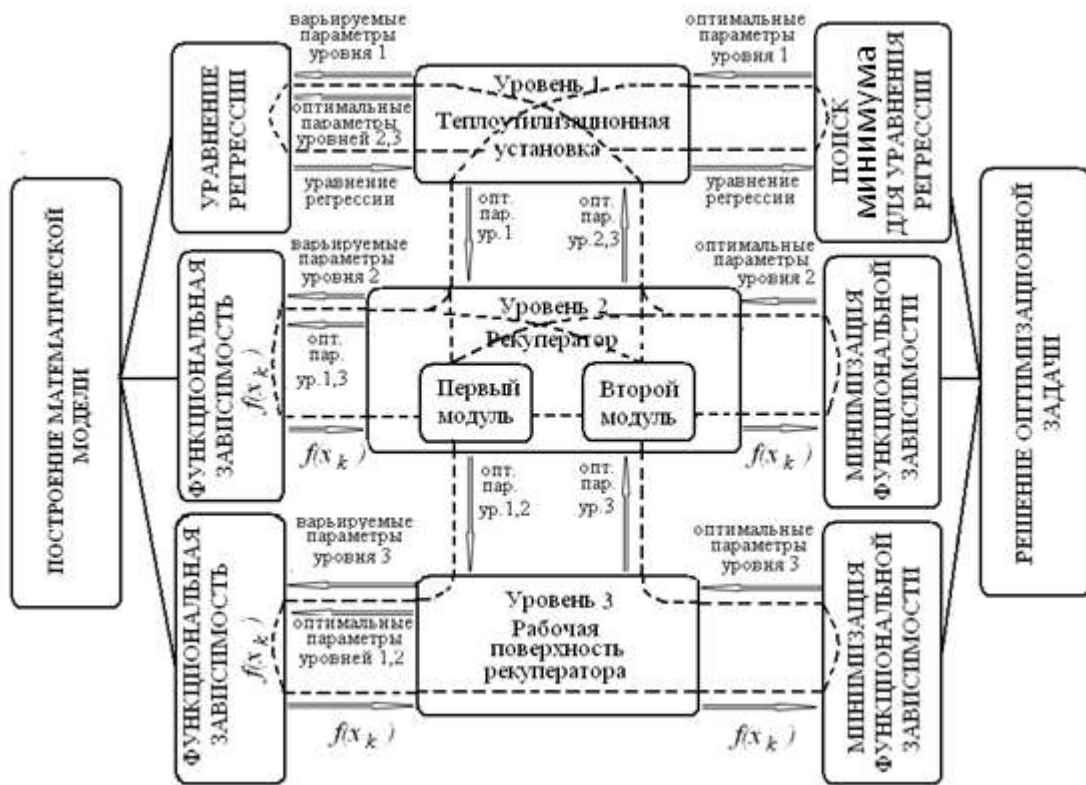


Рис. 1. Блок-схема многоуровневой оптимизации теплоутилизационной системы для стекловаренных печей

Реализации процесса многоуровневой оптимизация для каждой теплоутилизационной установки происходит в соответствии с основными принципами многоуровневой оптимизации. В случае необходимости схема рекурсивного обхода уровней оптимизации (на рис. 1-3 она представлена пунктирной линией) предусматривает ветвление на верхнем уровне, что обеспечивает в определенных условиях прекращение рекурсии, и ветвления на

других уровнях для введения в действие параллельных рекурсий, когда на одной рекурсивной ветви делается несколько рекурсивных вызовов.

В качестве примера приведены оптимальные значения режимных и конструкционных параметров для теплоутилизационной системы стекловаренной печи и агрегатированной теплоутилизационной установки для котельных с комбинированным использованием утилизированной теплоты, полученные на основе разработанного для теплоутилизационных систем метода, основанного на принципах многоуровневой оптимизации (табл.1,2).

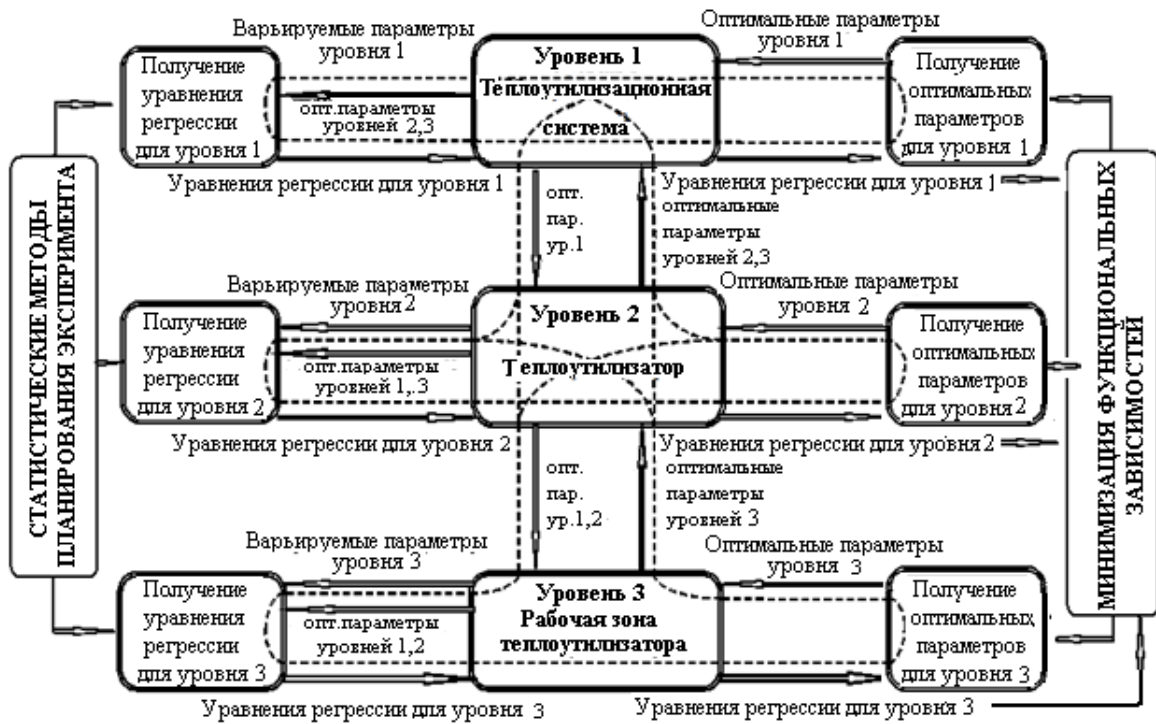


Рис.2. Блок-схема многоуровневой оптимизации теплоутилизационной системы для подогрева обратной воды котельных

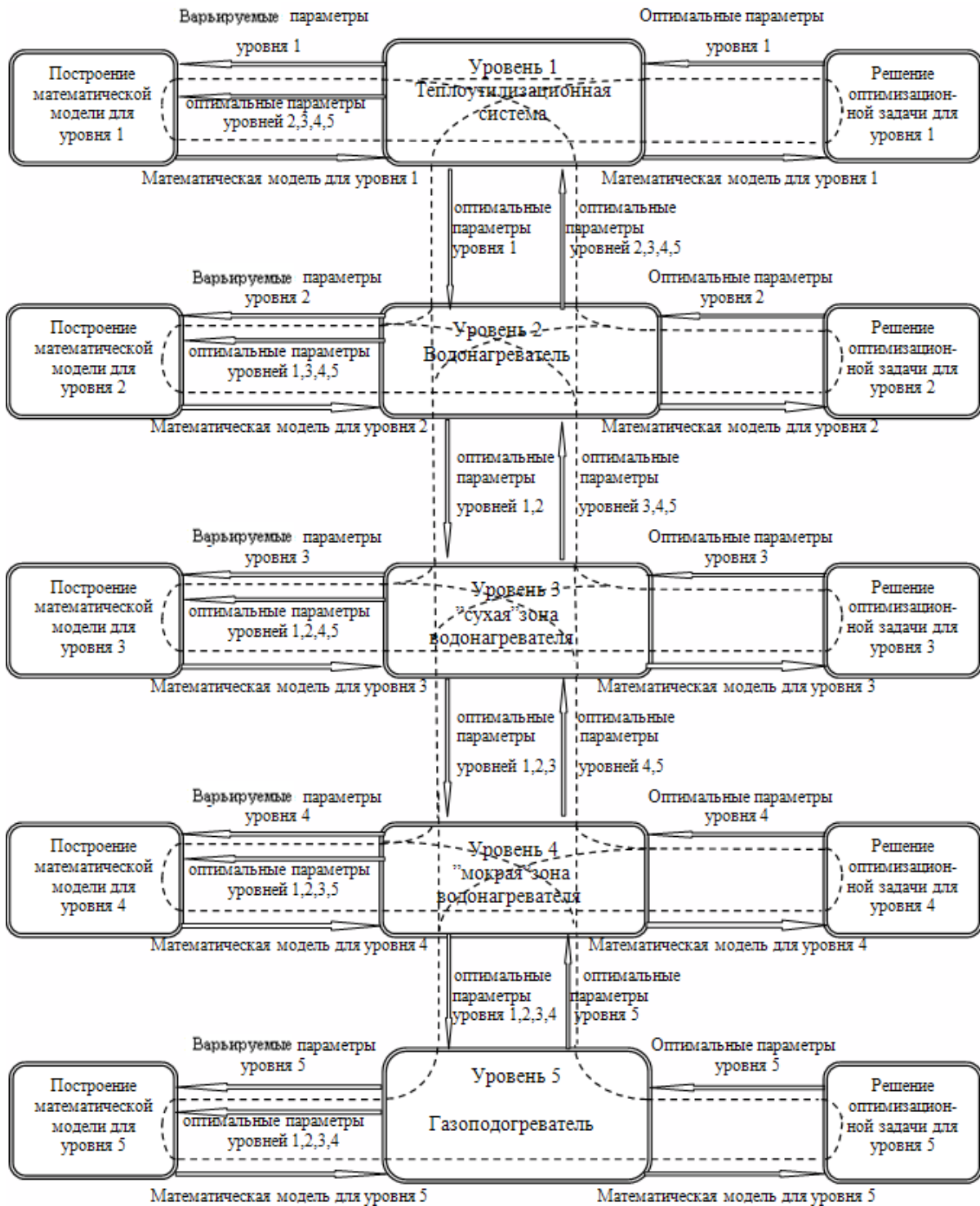


Рис.3. Блок-схема многоуровневой оптимизации агрегатированной теплоутилизационной установки для котельных с комбинированным использованием утилизированной теплоты

1. Оптимальные параметры теплоутилизационной системы стекловаренной печи, предназначенной для предварительного нагрева воздуха, поступающего в регенераторы печи

Уровень	Варьируемые параметры	Обозначения	Размерность	Оптимальные значения
Теплоутилизационная установка	Средняя скорость дымовых газов	$v^{д.г.}$	м/с	8,0...9,0
	Средняя скорость воздуха	$v^{воз.}$	м/с	11...15
	Начальная температура дымовых газов	t	$^{\circ}C$	400...450
Поверхностный концевой рекуператор	Коэффициент турбулизации воздушного потока	k		1,9...2,2
	Коэффициент загрязнения теплообменной поверхности	ξ		0...0,01
	Входная температура дымовых газов	t	$^{\circ}C$	400-450
	Отношение чисел Рейнольдса дымовых газов и воздуха	$Re^{дг} / Re^{воз}$		1,4...2,7
Рабочая зона рекуператора	Расстояние между панелями в направлении, перпендикулярном потоку газов	s_1	мм	68,0-73,0
	Расстояние между трубами в панели в продольном направлении	s_2	мм	70,0- 75,0
	Наружный диаметр трубы	d_2	мм	40,0-45,0.
	Толщина мембраны	δ	мм	1,5-2,0
	Высота мембраны	h	м	1,0 – 1,2

Использование полученных оптимальных значений режимных и конструкционных параметров при разработке конструкции теплоутилизационной системы для стекловаренной печи позволяет повысить КПД печи на 5-10 % и соответственно уменьшить тепловые потери.

2. Оптимальные параметры агрегатированной теплоутилизационной установки для котельных с комбинированным использованием утилизированной теплоты

Уровень	Варьируемые параметры	Обозначения	Размерность	Оптимальные значения
Утилизационная система	Средняя скорость дымовых газов	$v^{д.г.}$	м/с	8,0...9,0
	Средняя скорость воды	$v^{вод.}$	м/с	0,9...1,1
	Начальная температура дымовых газов	t	$^{\circ}C$	120...125
Поверхностный конденсационный теплоутилизатор	Удельная длина теплоутилизационной части	l/Q	м/МВт	0,3...0,4
	Удельная ширина теплоутилизационной части	B/Q	м/МВт	0,4...0,6
	Удельная высота теплоутилизационной части	H/Q	м/МВт	0,1...0,2
"Сухая" зона теплоутилизатора	Высота ребра	h	мм	10,0...11,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4...0,6
	Межреберный шаг	s	мм	3,0...3,5
"Мокрая" зона теплоутилизатора	Высота ребра	h	мм	11,0...13,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4...0,6
	Межреберный шаг	s	мм	4,0...5,0
Водогазовый газоподогреватель	Высота ребра	h	мм	7,0-9,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4-0,5
	Межреберный шаг	s	мм	2,5-3,0

Сравнительный анализ разработанных методов оптимизации, основанных на принципах структурно-вариантного подхода и принципах многоуровневой оптимизации, а также анализ эффективности рассмотренных теплоутилизационных систем, оптимизированных с помощью разработанных

методов показал, что метод, основанный на принципах многоуровневой оптимизации, позволяет учесть практически все технические потери в теплоутилизационной системе и оптимизировать большое число параметров, чего не удастся сделать при использовании структурно-вариантного подхода. Кроме того, эффективность теплоутилизационных систем, оптимизированных с использованием метода, основанного на принципах многоуровневой оптимизации, на 2-3 % выше эффективности тех же систем, оптимизированных с использованием структурно-вариантного подхода.

Выводы

1. На основе принципов многоуровневой оптимизации разработан метод оптимизации для теплоутилизационных систем котельных агрегатов и стекловаренных печей.

2. В рамках разработанного метода для рассматриваемых теплоутилизационных систем построены структурные схемы, блок-схемы многоуровневой оптимизации, схемы рекурсивного обхода уровней оптимизации.

3. Сравнительный анализ методов оптимизации показал, что метод, основанный на принципах многоуровневой оптимизации, позволяет оптимизировать большое число параметров, чего не удастся сделать при использовании метода, основанного на принципах структурно-вариантного подхода.

4. Эффективность теплоутилизационных установок, оптимизированных с использованием метода, основанного на принципах многоуровневой оптимизации, на 2-3 % выше эффективности тех же установок, оптимизированных с использованием структурно-вариантного подхода.

Список литературы

1. 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. 41-46.
2. Фиалко Н. М. Оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, Ю. В. Шеренковский // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 81-88.
3. Фиалко Н. М. Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Г. А. Пресич, Г. А. Гнедаш // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 71-79.
4. Бойко А. В. Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин с учетом режимов эксплуатации / А. В. Бойко, Ю. Р. Говорущенко, А. П. Усатый, А. С. Руденко // Тяжелое машиностроение. – 2009, №9. – С. 11 – 15.

References

1. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodskaaya, R., Sherenkovsky, Y. (2014). Effektivnost' teploutilizatsionnoy ustanovki dlya kotel'nykh, optimizirovannoy razlichnymi metodami [The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods]. Promyshlennaya teplotekhnika, 36 (1), 41 – 46.
2. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodskaaya, R., Sherenkovsky, Y. (2014). Optimizatsiya teploutilizatsionnoy ustanovki steklovarennoy pechi [Optimization of heat recovery installation glass furnace Promyshlennaya teplotekhnika], 36 (5), 81 – 88.
3. Fialko, N., Stepanova, A., Presitsh, G., Gnedash, G. (2015). Analiz effektivnosti teploutilizatsionnoy ustanovki dlya nagrevaniya i uvlazhneniya dut'yevogo vozdukha kotloagregata [Analysis of efficiency heat recovery systems for heating and humidifying the air blast boiler] Promyshlennaya teplotekhnika, 37 (4), 71 – 79.
4. Boiko, A., Govorutchenko, J., Usatu, A., Rudenko, A. (2009). Metodika i algoritm optimizatsii protochnikh chastey osevikh turbin s uchetom rezhimov ekspluatatsii [Methodology and alhorithm of optimithation of turbine setting with taking into account the condition of use] Tiageloe maghinostroenie, 9, 11 – 15.

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК(ЧАСТИНА 2)

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

Анотація. *Прогресивно зростаючі ціни на природний газ в Україні обумовлюють необхідність впровадження нових енергоефективних технологій в усіх сферах народного господарства, в тому числі в сфері промислової та*

комунальної теплоенергетики. В умовах дефіциту енергоресурсів енергетика України відчуває потребу у високоякісному обладнанні енергетичних установок, в тому числі теплоутилізаційних, розробленому з використанням сучасних ефективних методів оптимізації. Сказане визначає актуальність роботи.

Мета роботи - розробка для складних теплоутилізаційних систем котельних установок і скловарних печей ефективних методів, заснованих на принципах багаторівневої оптимізації.

Відповідно до зазначених принципів багаторівневої оптимізації теплоутилізаційні системи скловарних печей і котельних установок розділені на кілька рівнів оптимізації, розроблено блок-схеми багаторівневої оптимізації та схеми рекурсивного обходу рівнів оптимізації, обрано методи побудови математичних моделей, рекурсивні цільові функції оптимізації і варійовані параметри для кожного рівня оптимізації, визначено оптимальні параметри систем. Наведено отримані з використанням розробленого методу оптимальні значення режимних і конструкційних параметрів для теплоутилізаційної системи скловарної печі і агрегатованою теплоутилізаційної установки для котелень з комбінованим використанням утилізованої теплоти. Порівняльний аналіз методів оптимізації показав, що метод, заснований на принципах багаторівневої оптимізації, дозволяє оптимізувати велике число параметрів, чого не вдається зробити при використанні методу, заснованого на принципах структурно-варіантного підходу. Ефективність теплоутилізаційних установок, параметри яких оптимізовано із використанням методу, заснованого на принципах багаторівневої оптимізації, на 2-3 % вище ефективності тих же установок, параметри яких оптимізовано із використанням методу, заснованого на принципах структурно-варіантного підходу.

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

**DEVELOPMENT OF EFFECTIVE METHODS OF OPTIMIZATION
COMPLEX HEAT RECOVERY SYSTEMS
ENERGY INSTALLATIONS (PART 2)
N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska**

Abstract. Prices for natural gas in Ukraine are continuously growing. This necessitates the introduction of new energy-efficient technologies in all spheres of the national economy, including in the sphere of industrial and municipal heat and power engineering. In the conditions of a shortage of energy resources, Ukraine's energy sector is in need of high-quality equipment for power plants, including heat recovery, developed using modern effective optimization methods. This determines the relevance of the work.

The purpose of the work is the development of effective methods or complex heat recovery systems of boiler plants and glass melting furnaces based on the principles of multi-level optimization.

In accordance with the above principles of multi-level optimization, the heat recovery systems of glass melting furnaces and boiler plants are divided into several levels of optimization, block diagrams for multi-level optimization and schemes for recursive optimization levels are developed, methods for constructing mathematical models, recursive target optimization functions and variable parameters for each level of optimization. The optimal parameters of the systems are determined. The optimum values of regime and design parameters for the heat recovery system of a glass melting furnace and an aggregate heat recovery unit for boilers with combined use of recycled heat are presented using the developed method. Comparative analysis of optimization methods has shown that a method based on the principles of multi-level optimization allows to optimize a large number of parameters, which cannot be done using a method based on the principles of the structural-variant approach. The efficiency of heat recovery units, the parameters of which are optimized using the method based on the principles of multilevel optimization, are 2-3 % higher than the efficiency of the same facilities whose parameters are optimized using the method based on the principles of the structural-variant approach.

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