

УДК 621.036.7

Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И.,
Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАЦИОННОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

За допомогою методів планування експерименту та регресійного аналізу для теплоутилизатора конденсаційного типу проведено оптимізацію ексерго-технологічного критерія ефективності за основними геометричними параметрами ребреної поверхні теплообміну. З урахуванням умов виготовлення та експлуатації ребреної поверхні визначено оптимальні області зміни її геометричних параметрів.

С помощью методов планирования эксперимента и регрессионного анализа для теплоутилизатора конденсационного типа проведена оптимизация эксерго-технологического критерия эффективности по основным геометрическим параметрам ребренной поверхности теплообмена. С учетом условий изготовления и эксплуатации ребренной поверхности определены оптимальные области изменения ее геометрических параметров.

With the help of methods of experiment planning and regression analysis for a condensation type heat utilizer, the optimization of exergy-technological criterion of efficiency is carried out by the basic geometrical parameters of ribbed heat transfer surfaces. In view of the conditions of manufacturing and operation of ribbed surfaces, we determine the optimum ranges of change in its geometrical parameters.

B – безразмерный параметр для толщины ребра;
 ν – толщина ребра;
 d – диаметр трубы;
 E – эксергетическая мощность;
 H – безразмерный параметр для высоты ребра;
 h – высота ребра;
 K – капитальные затраты;
 k – теплотехнический критерий;
 k_{ex}^T – эксерго-технологический критерий;
 m_0 – удельная материалоемкость;

N – мощность на прокачку теплоносителя;
 N_{Π} – число точек плана;
 n – число независимых параметров (факторов);
 Q – тепловая мощность;
 S – безразмерный параметр для межреберного шага;
 s – межреберный шаг;
 X_i – кодовая переменная;
 x_i – физическая переменная.
Индексы нижние:
пот – потери.

Основной потерей теплоты в котельных агрегатах является потеря теплоты с уходящими газами (17...18%). При работе котла в номинальном режиме температурный диапазон уходящих газов, составляющий 120...140 °С, в течение длительного времени во всем мире был признан оптимальным, т.к. обеспечивал минимальные затраты на изготовление и эксплуатацию котельного агрегата. Однако появившаяся в последние годы в Украине возможность использования более совершенных технологий для производства поверхностей нагрева теплообменных аппаратов, с одной стороны, и необходимость снижения расхода топлива и повышения КПД котельных

агрегатов – с другой, обусловила целесообразность применения в системах утилизации теплоты поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа. Осуществляемое в них охлаждение продуктов сгорания ниже точки росы водяного пара, содержащегося в дымовых газах, позволяет использовать теплоту конденсации пара, что существенно повышает эффективность теплоутилизации. Благодаря уменьшению расхода топлива и растворению в полученном конденсате образующихся в процессе горения вредных веществ, конденсационные теплоутилизаторы характеризуются повышенной экологической эффективностью [1]. Применение в таких теплоутилизаторах раз-

витых оребренных поверхностей нагрева, которые обеспечивают высокую интенсивность теплообмена и, кроме того, имеют небольшие массогабаритные характеристики, позволяет существенно повысить эффективность систем утилизации теплоты. Решение оптимизационной задачи при проектировании таких систем является весьма актуальным [2].

В общем случае эффективность теплообменных аппаратов, используемых для утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа, определяется многочисленными термодинамическими, теплотехническими, технологическими и экономическими параметрами. Применение комплексного подхода к оценке эффективности систем утилизации теплоты позволило объединить наиболее важные из этих параметров: потери эксергетической мощности, полезную эксергетическую мощность, тепловую мощность, удельную материалоемкость, капитальные затраты в предложенные критерии эффективности [3]. В настоящей работе для решения оптимизационной задачи среди предложенных критериев эффективности в качестве целевой функции оптимизации выбран эксерго-технологический критерий

$$k_{ex}^T = (E_{пот} m_0) / Q,$$

который позволяет проанализировать эффективность теплоутилизаторов с эксергетической, теплотехнической и технологической позиций. Из многочисленных независимых параметров, влияющих на эксерго-технологическую эффективность теплоутилизаторов, выделены наиболее важные конструктивные характеристики. Это геометрические параметры оребренной поверхности: высота ребра, толщина ребра и величина межреберного шага. Для нахождения их оптимальных значений следует провести оптимизацию эксерго-технологического критерия по этим параметрам.

Целью работы является установление оптимальных параметров оребренной поверхности теплообмена конденсационного теплоутилизатора на основании оптимизация эксерго-технологического критерия эффективности.

Для получения эксергетических характеристик и эксерго-технологического критерия эф-

фективности использовался интегральный балансовый метод эксергетического анализа, включающий аналитические зависимости, которые учитывают изменение влагосодержания дымовых газов при их прохождении через конденсационный теплоутилизатор [4–7]. С целью сокращения объема исследований и повышения надежности результатов использованы статистические методы планирования эксперимента и регрессионный анализ [8,9]. Эти методы позволяют:

- получать максимум информации об изучаемых процессах и явлениях при минимальном количестве исходных данных;
- изучать и математически описывать процессы при неполном знании их механизма;
- получать математические модели сложных процессов, в которых функции отклика зависят от нескольких параметров;
- решать задачи поиска экстремума в n -мерном факторном пространстве и, следовательно, оптимального управления процессами.

В данной работе использованы статистические методы планирования эксперимента, которые позволяют получить математическую модель исследуемого объекта (уравнение регрессии) в виде полинома второго порядка. Планы второго порядка являются, как правило, композиционными, т.е. состоящими из нескольких блоков, реализуемых последовательно:

- полный или дробный факторный эксперимент;
- центральные точки, расположенные в начале координат факторного пространства;
- звездные точки, координаты которых соответственно равны нулю, за исключением одной координаты, которая принимает значение $+\alpha$ и $-\alpha$, где α – звездное плечо.

В настоящем исследовании реализован ортогональный центральный композиционный план с числом точек плана:

$$N_{\Pi} = 2^n + 2n + 1 = 15.$$

Его применение позволяет сократить объем исследований примерно в 20 раз.

Исследовался теплоутилизатор конденсационного типа, поверхность теплообмена которого состоит из биметаллических труб с оребрением

Табл. 1. Условия проведения исследований

Характеристика Уровень варьирования факторов		Высота ребра h , мм	Толщина ребра b , мм	Межреберный шаг s , мм
Основной уровень, нулевая точка	x_{i0}	10	0,6	5
Верхний уровень	x_i^B	17	0,8	7
Нижний уровень	x_i^H	3	0,4	3
Звездные точки	x_i^B	18,5	0,84	7,4
	x_i^H	1,5	0,36	2,6
Интервал варьирования	δ_i	7	0,2	2

(стальная основа и алюминиевое оребрение). Выбор материала оребрения определялся более высокими значениями теплопроизводительности на единицу массы для ребер из алюминия, которые в 3...7 раз превышают соответствующие значения для ребер из чугуна и нержавеющей стали. В качестве независимых факторов выбраны высота ребра, толщина ребра и величина межреберного шага оребренной поверхности теплообмена, в качестве функции отклика – величина эксерго-технологического критерия. Условия проведения исследований приведены в табл. 1.

Уровни варьирования физических переменных (факторов) выбирались с учетом реальных требований к конструкциям оребренных поверхностей теплообменника. Область изменения геометрических параметров ребер была достаточно широкой и с учетом звездных точек составляла: для высоты ребра – 1,5...18,5 мм; толщины ребра – 0,36...0,84 мм; межреберного шага – 2,6...7,4 мм. Была составлена матрица планирования эксперимента в кодовых переменных (табл. 2). В таблице приведены усредненные по трем параллельным испытаниям значения эксерго-технологического критерия эффективности. Для каждой серии испытаний проводилась рандомизация порядка проведения опытов.

Ортогонализация столбцов X_0, X_i^2 проводилась путем преобразования:

$$X_i^* = X_i^2 - (1/N_{\Pi}) \sum_g X_{gi}^2 = X_i^2 - 0,73.$$

Была принята гипотеза о незначимости тройного взаимодействия. Оценка однородности дис-

персий на каждом уровне факторов проводилась по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена $G_p = 0,233$ сравнивалось с табличным значением G_T , которое при уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f_1 = 2$ составляло $G_T = 0,335$. Поскольку $G_p < G_T$, то полученные дисперсии однородны. Проведен расчет и статистический анализ коэффициентов уравнения регрессии. Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии проводилась по критерию Стьюдента. С учетом значимости коэффициентов получено следующее уравнение регрессии в кодовых переменных:

$$Y = 0,32677 + 0,11929X_1^2 - 0,00619X_2^2 - 0,01728X_3^2 - 0,17179X_1 + 0,00763X_2 + 0,06114X_3 + 0,00312X_1 X_2 - 0,03414X_1 X_3 - 0,00323X_2 X_3.$$

Проверка адекватности полученного уравнения осуществлялась по критерию Фишера F . Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 2,82$ сравнивалось с табличным значением F_T , которое при уровне значимости $q = 0,05$ и числах степеней свободы $f_1 = 30$ и $f_2 = 5$ составляло $F_T = 4,5$. Поскольку $F_p < F_T$, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает использованные данные. Переход в уравнении регрессии от кодовых переменных к физическим осуществлялся в соответствии с формулой:

$$X_i = (x_i - x_{i0})/\delta_i.$$

Тогда уравнение регрессии в физических переменных, описывающее зависимость величины

Табл. 2. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^*	X_2^*	X_3^*	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	k_{ex}^T
1	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	1	1	1	0,470
2	1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	1	0,214
3	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	1	-1	0,484
4	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1	-1	-1	0,248
5	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	1	-1	-1	0,674
6	1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	-1	1	-1	0,290
7	1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	1	0,683
8	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	1	1	1	0,301
9	1	-1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	0,762
10	1	1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	0,251
11	1	0	-1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	0,313
12	1	0	1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	0,329
13	1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	0,247
14	1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	0,362
15	1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	0,319

эксерго-технологического критерия от высоты ребра, толщины ребра и величины межреберного шага оребренной поверхности теплообмена, принимает вид:

$$k_{ex}^T = 0,34340 + 0,00244h^2 - 0,15475b^2 - 0,00432s^2 - 0,06237h + 0,24190b + 0,10300s + 0,00223hb - 0,00244hs - 0,00808bs. \quad (1)$$

Использование необходимого условия существования экстремума для функции нескольких переменных позволило получить соответствующие поверхности (рис. 1) и значения точки экстремума, которые составили: $h = 15,9$ мм, $b = 0,7$ мм, $s = 6,8$ мм. Для удовлетворения достаточным условиям существования экстремума функция исследована в области значений, близких к полученным значениям точки экстремума. Это позволило установить, что в точке $h = 15,9$ мм функция проходит через минимум, а в точках $b = 0,7$ мм и $s = 6,8$ мм – через максимум. Для уточнения оптимальных значений геометрических параметров найдены значения функции, т.е. величины эксерго-технологического критерия, в точке экстремума и в точках, для которых значение одного из факторов $h = 15,9$ мм, т.е. соответствует минимуму функции, а значения остальных факторов соответствуют верхнему,

основному и нижнему уровням варьирования. В табл. 3 представлены полученные результаты.

Как видно из таблицы, при $h = 15,9$ мм наименьшее значение эксерго-технологического критерия $k_{ex}^T = 0,198$ кг/кВт соответствует следующим значениям геометрических параметров поверхности теплообмена: $b = 0,4$ мм, $s = 3,0$ мм. Удаление значений указанных параметров от точек их экстремумов требует уточнения значения оптимальной высоты ребра. В соответствии с формулой (1) получена зависимость эксерго-технологического критерия от высоты ребра для значений $b = 0,4$ мм, $s = 3,0$ мм (рис.2). Для проведения сравнительного анализа результатов оптимизации предложенного эксерго-технологического критерия и результатов оценки эффективности с помощью одного из наиболее употребляемых теплотехнических критериев $k = Q/N$, получена зависимость k от высоты ребра для нескольких значений b и s (рис.3). Как видно из рисунков 2 и 3, в области исследуемых значений геометрических параметров для теплотехнического критерия экстремум не наблюдается, тогда как для предложенного эксерго-технологического критерия минимум выражен достаточно четко и лежит в области $h = 14$ мм. Таким образом, значения геометрических параметров $h = 14$ мм, $b = 0,4$ мм, $s = 3,0$ мм следует считать оптимальными для

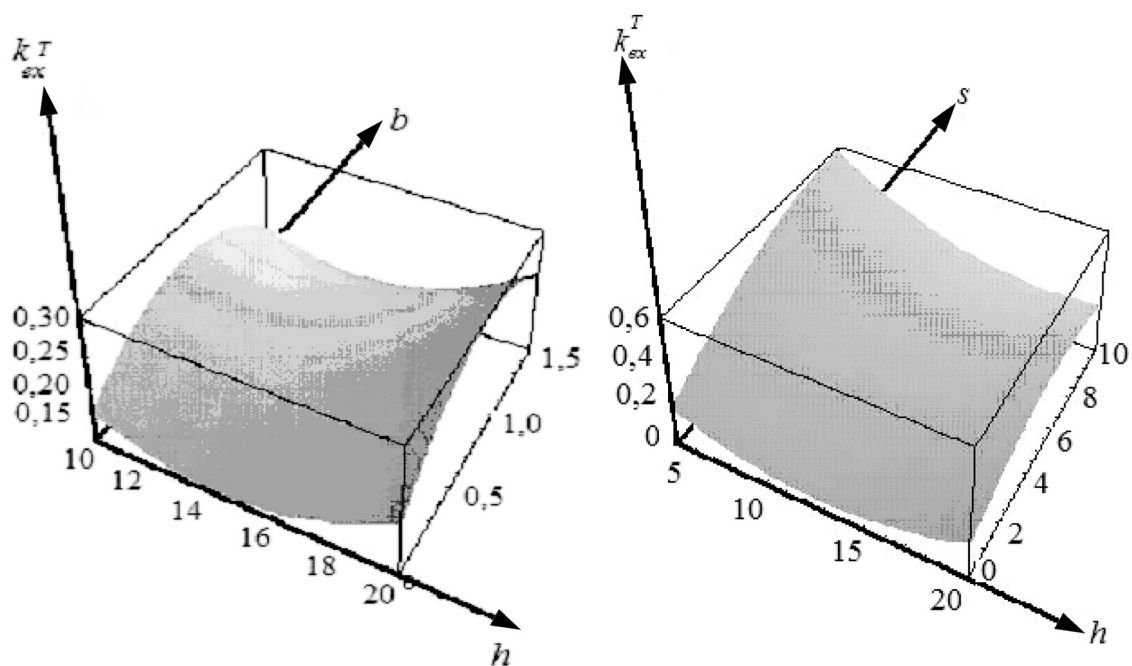


Рис. 1. Оптимизация эксерго-технологического критерия эффективности.

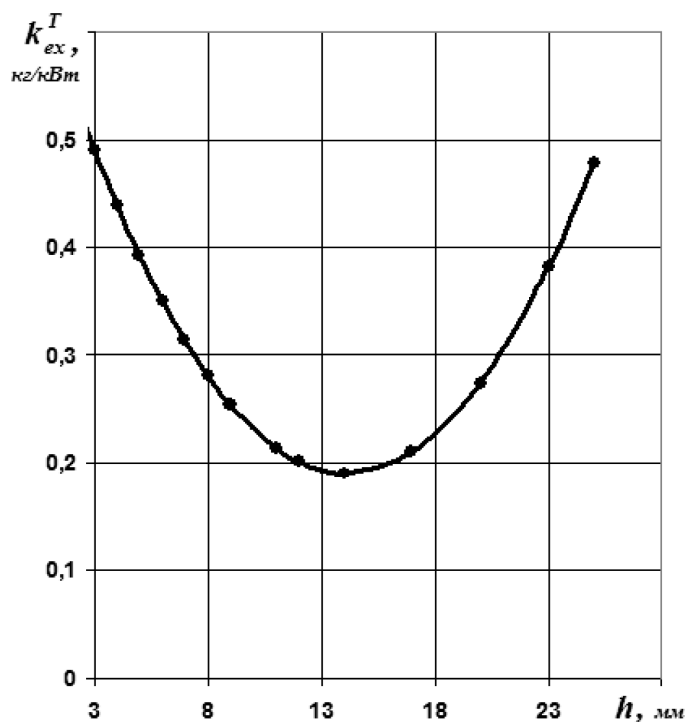


Рис. 2. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T конденсационного теплоутилизатора от высоты ребра h оребренной поверхности теплообмена: ширина ребра $b = 0,4$ мм, величина межреберного шага $s = 3,0$ мм.

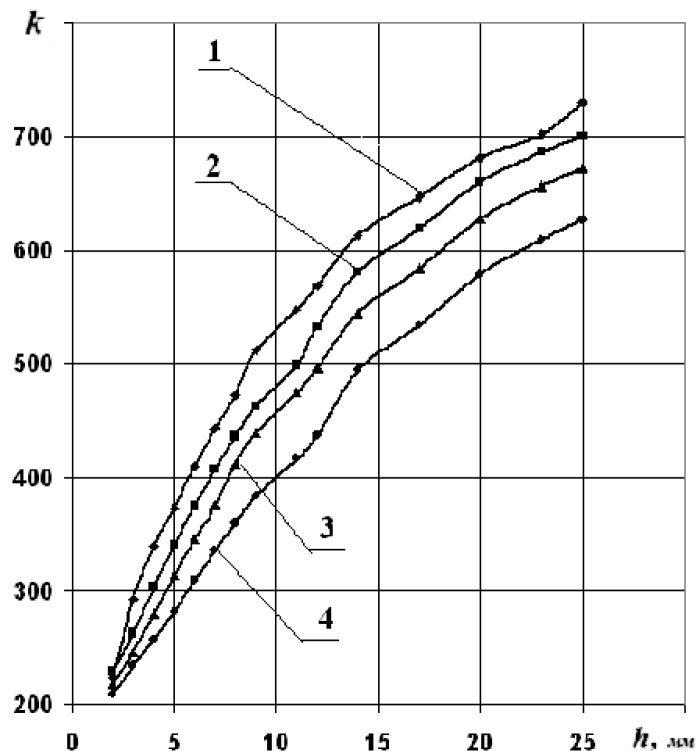


Рис. 3. Зависимость теплотехнического критерия эффективности k конденсационного теплоутилизатора от высоты ребра h оребренной поверхности теплообмена: 1 – $b = 0,4$ мм; $s = 3,0$ мм; 2 – 0,4, 4,0; 3 – 0,4, 5,0; 4 – 0,4, 7,0.

Табл. 3. Определение оптимальных значений геометрических параметров

Высота ребра h , мм	Толщина ребра b , мм	Межреберный шаг s , мм	Критерий k_{ex}^T , кг/кВт
15,9	0,7	6,8	0,284
15,9	0,8	7,0	0,283
15,9	0,6	5,0	0,267
15,9	0,4	3,0	0,198
14,0	0,4	3,0	0,190

данного типа оребренной поверхности рассмотренного теплоутилизатора конденсационного типа. Для безразмерных параметров:

$$H = h/d, \quad B = b/d, \quad S = s/d$$

оптимальные значения соответственно составляют: $H = 0,48$; $B = 0,014$; $S = 0,103$.

Значение эксерго-технологического критерия в области минимума составляет:

$$k_{ex}^T = 0,190 \text{ кг/кВт.}$$

Исходя из полученных значений оптимальных геометрических параметров оребренной поверхности, можно указать рациональные области изменения этих параметров с учетом дополнительных факторов. Так, целесообразность использования ребер высотой, больше оптимальной, определяется их большей технологичностью, т. е. меньшей трудоемкостью в изготовлении. С другой стороны, одним из условий, определяющих целесообразность использования ребер высотой, меньше оптимальной, является требование, чтобы его максимальная температура не превышала точку росы, что необходимо для обеспечения эффективной работы теплообменной поверхности в конденсационном режиме. Таким образом, для высоты ребра рациональная область значений может составлять $h = 11...17$ мм ($H = 0,38...0,59$). Для толщины ребра эта область может составлять $b = 0,4...0,6$ мм ($B = 0,007...0,02$), что связано только с технологическими трудностями изготовления "мелких ребер". И для межреберного шага учет таких факторов, как необходимость стекания конденсатной пленки и очистки ребер, приводит к целесообразности использования следующей области значений $s = 3,0...6,0$ мм ($S = 0,10...0,21$).

Выводы

1. С использованием методов планирования эксперимента и регрессионного анализа для теплоутилизатора конденсационного типа проведена оптимизация эксерго-технологического критерия эффективности и определены оптимальные значения геометрических параметров оребренной поверхности теплообмена.

2. Учет условий изготовления и эксплуатации указанной поверхности позволил установить рациональные области изменения геометрических параметров.

3. Рассмотренные конденсационные теплоутилизаторы с полученными оптимальными параметрами оребренной поверхности могут быть использованы для создания эффективных теплоутилизационных схем, предназначенных для нагрева воды систем теплоснабжения (отопления и горячего водоснабжения), а также для технологических нужд котельных и предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Прокопов В.Г., Пресич Г.А. Сингаевская С.И. Проблема оптимизации параметров труб с поперечным оребрением в конденсационных теплоутилизаторах // Промышленная теплотехника. — 1999. — Т. 21, № 1. — С. 33–35.
2. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Дубровин В.А. Оптимизация технических систем методами эксергоэкономики // Промышленная теплотехника. — 2003. — Т. 25, № 5. — С. 57–60.
3. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Долгополов И.С., Голубинский П.К., Навродская Р.А., Новаковский М.А. Эксергетический

анализ эффективности утилизатора теплоты отходящих теплового двигателя когенерационной установки // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 7. – С. 13–16.

4. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 388 с.

5. Дубинин А.Б., Андрищенко А.И., Осипов В.Н. Эксергетический метод исследований как основа совершенствования теплоэнергетических установок // Вестн. Саратов. ГТУ. – 2004. – № 3 (4). – С. 31–44.

6. Эксергетический расчет технических систем. Справочное пособие. Под ред. Долинского А.А. – К.: Наукова Думка, 1991. – 360 с.

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

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

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

Получено 14.03.2008 г.

УДК 662.6

**БАШТОВОЙ А.И., ЖОВМИР Н.М.,
РАДЧЕНКО С.В., ЧАПЛЫГИН С.М.**

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛОМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ ДОНЕЦКОЙ ОБЛАСТИ

Показано перспективи використання соломи на об'єктах комунальної енергетики Донецької області з метою заміщення викопних палив. Проведено аналіз територіального розподілу ресурсів соломи та умов її транспортування до існуючих опалювальних котельень. Перехід до використання соломи запропоновано розпочати з впровадження котлів періодичної дії в котельнях малої потужності з подальшим оснащенням крупних котельень потужними котлами безперервної дії. Наведено результати оцінки техніко-економічної ефективності використання соломи як палива.

Показаны перспективы использования соломы на объектах коммунальной энергетики Донецкой области с целью замещения ископаемых топлив. Выполнен анализ территориального распределения ресурсов соломы и условий ее транспортирования к существующим отопительным котельным. Переход к использованию соломы предложено начать с внедрения котлов периодического действия в котельнях малой мощности и последующим оснащением крупных котельных мощными котлами непрерывного действия. Приведены результаты оценки технико-экономической эффективности использования соломы в качестве топлива.

The prospects of straw using instead of fossil fuels at the boiler houses of municipal heat supply enterprises of the Donetsk region are shown. The territorial distribution of straw resources and the possibilities of its transportation to existing boiler houses were analysed. It was proposed to start straw using with whole bale boilers implementation at small boiler houses with subsequent application of powerful continuous acting boiler at large boiler houses. Results of technical and economic feasibility calculations are given.

По статистическим данным, Украина ежегодно потребляет около 180...210 млн. т у. т. топливно-энергетических ресурсов и принадлежит к энергозависимым странам. Цены на импортируемые традиционные энергоносители постоянно увеличиваются. Поэтому ведущие страны мира расши-

ряют использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), среди которых первое место занимает биомасса (дрова и отходы деревообработки, солома сельскохозяйственных культур, биогаз и т. п.). Зарубежный опыт свидетельствует, что часть биомассы в общем потреблении пер-