

УДК 536.423

ШКЛЯР В.И., ДУБРОВСКАЯ В.В., ЗАДВЕРНЮК В.В.

*Национальный технический университет Украины “КПИ”*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В КОНТАКТНОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Запропоновано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта ефективності тепломассообміну при конденсації пари з парогазової суміші в контактному конденсаторі теплоутилізаційного контуру парогазових установок. Визначено границю ефективного використання конденсатора.

Предложено критеріальное уравнение для определения коэффициента эффективности тепломассообмена при конденсации пара из парогазовой смеси в контактном конденсаторе теплоутилизационного контура парогазовых установок. Определена граница эффективного использования конденсатора.

Criterial equation for the efficiency factor of heat and mass transfer during steam condensation from steam-gas mixture in direct contact condenser of heat utilization system steam and gas generating units is offered. The limit of effective usage of condenser is determined.

$d$  – влагосодержание;

$d_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный диаметр;

$l/d_{\text{ЭКВ}}$  – геометрический фактор насадки;

$E$  – коэффициент эффективности тепломассообмена;

$G$  – плотность орошения;

$G/W$  – коэффициент орошения;

$I$  – энтальпия греющего теплоносителя;

$l$  – высота насадки;

ПГУ – парогазовая установка;

$W$  – скорость;

ПГС – парогазовая смесь.

**Индексы**

1 – вход;

2 – выход;

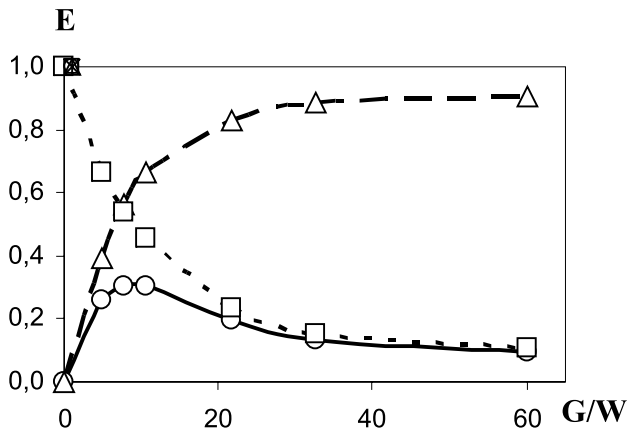
ОХЛ – охлаждение;

НАГР – нагревание.

Одним из перспективных направлений получения тепловой и электрической энергии является использование парогазовых установок (ПГУ). Повышение эффективности работы установок можно достичь путем использования в качестве теплообменного оборудования в теплоутилизационном контуре контактных конденсаторов с сетчатыми насадками для охлаждения и конденсации пара из парогазовой смеси. Применение контактного аппарата позволяет снизить температурный перепад в конденсаторе, что приводит к уменьшению габаритов и металлоемкости теплообменника. При этом в контактном конденсаторе генерируется дополнительная вода, образующаяся при сжигании водорода, находящегося в топливе, и происходит абсорбционная очистка входящих газов от оксидов азота и углерода.

При проектировании и эксплуатации теплоутилизующего контура с контактными теплообменниками необходимо иметь зависимость, которая позволяет определять условия достижения максимальной эффективности процессов тепломассообмена при заданных начальных параметрах теплоносителей. В литературных источниках рассматривается большое количество технико-экономических показателей, анализ которых свидетельствует об отсутствии в них единого методологического подхода к оценке эффективности теплообменников.

В контактном конденсаторе одновременно протекают два процесса: охлаждение парогазовой смеси и нагрев охлаждающей жидкости. Учитывая это, коэффициент эффективности тепломассообмена определяется произведением



**Рис. 1. Зависимость коэффициентов интенсивности теплообмена от коэффициента орошения.**

○ –  $E$ ; △ –  $E_{\text{НАГР}}$ ; □ –  $E_{\text{ОХЛ}}$ ;

коэффициента эффективности охлаждения парогазовой смеси и коэффициента эффективности нагрева охлаждающей жидкости [1]:

$$E = E_{\text{ОХЛ}} \cdot E_{\text{НАГР}}, \quad (1)$$

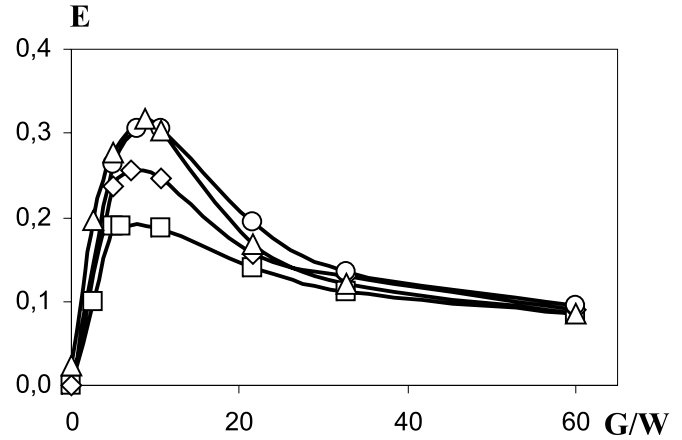
где  $E_{\text{ОХЛ}} = (I_1 - I_2) / (I_1 - I_{(1)})$ ,  $E_{\text{НАГР}} = (i_2 - i_1) / (i_{(1)} - i_1)$ ;

$I_1$ ,  $I_2$  и  $i_1$ ,  $i_2$  – энтальпии греющего и воспринимающего теплоносителей на входе и выходе;  $I_{(1)}$  и  $i_{(1)}$  – энтальпии греющего теплоносителя при начальной температуре воспринимающего и воспринимающего при начальной температуре греющего.

Целью данной работы являлось определение коэффициента эффективности теплообмена в контактном конденсаторе в зависимости от геометрических характеристик и геометрического фактора насадки  $l/d_{\text{ЭКВ}}$ , параметров парогазовой смеси и коэффициента орошения  $G/W$ .

Для решения данной задачи были обработаны экспериментальные данные, полученные на модели контактного конденсатора теплоутилизационного контура парогазовой установки. Рассмотрен противоточный режим движения парогазовой смеси и воды в сетчатых насадках различной геометрии и при различных параметрах рабочих сред [2].

В процессе подготовки и проведения опытов было определено, что на процесс теплообмена в контактных конденсаторах существенно влияют: параметры горячего (скорость  $W$ , влагосодержание  $d$  и теплофизические свойства вещества) и холодного (плотность орошения  $G$ , тепло-



**Рис. 2. Зависимость коэффициента интенсивности теплообмена  $E$  от коэффициента орошения при различных высотах насадки  $l$ :**

○ –  $l = 0,11$  м; □ –  $l = 0,04$  м;

△ –  $l = 0,155$  м; ◇ –  $l = 0,08$  м.

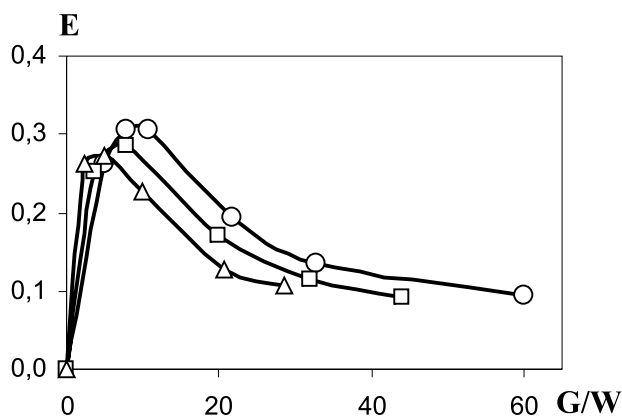
физические свойства вещества) теплоносителей, а также геометрические характеристики насадки (эквивалентный диаметр  $d_{\text{ЭКВ}}$  и высота  $l$ ).

Скорость сухих газов  $W$  относили к пустому сечению контактной камеры конденсатора и определяли по температуре газов на входе в аппарат. Плотность орошения  $G$  определяли как отношение начального расхода воды к площади поперечного сечения контактной камеры.

Зависимости коэффициентов эффективности теплообмена, охлаждения парогазовой смеси и нагрева жидкости при контактной конденсации парогазовой смеси от коэффициента орошения при  $W = 1,7$  м/с,  $d = 0,61$  кг влаги / кг сух. возд,  $l = 0,11$  м,  $d_{\text{ЭКВ}} = 0,043$  м представлены на рис.1. При рассмотрении только охлаждения парогазовой смеси эффективность определяется коэффициентом  $E_{\text{ОХЛ}}$ , при нагреве воды –  $E_{\text{НАГР}}$ . В случае, когда необходимо обеспечить эффективное охлаждение газов при оптимальном нагреве воды, определяется коэффициент  $E$ .

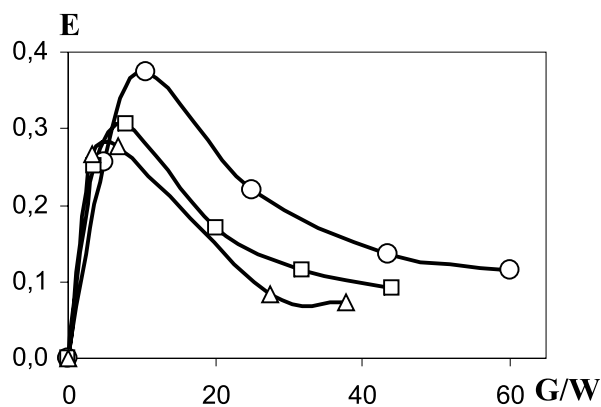
Из рис.1 видно, что существует оптимум коэффициента орошения, при котором  $E$  имеет максимальное значение. Справа и слева от оптимума располагаются коэффициенты  $E$  с одинаковым значением, при этом коэффициенты орошения различны.

На рис. 2 представлена зависимость  $E$  от  $G/W$  для различных значений высот насадки  $l$  при  $d_{\text{ЭКВ}} = 0,043$  м. Из рисунка видно, что увеличение



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента интенсивности теплообмена  $E$  от коэффициента орошения при различных скоростях  $W$ :

- $\triangle$  –  $W = 3,4$  м/с;  $d = 0,6$  кг/кг;
- $\square$  –  $W = 2,3$  м/с;  $d = 0,6$  кг/кг;
- $\circ$  –  $W = 1,7$  м/с;  $d = 0,6$  кг/кг.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента интенсивности теплообмена от коэффициента орошения при различном влагосодержании  $d$ .

- $\circ$  –  $W = 3,4$  м/с;  $d = 1,1$  кг/кг;
- $\square$  –  $W = 2,3$  м/с;  $d = 0,6$  кг/кг;
- $\triangle$  –  $W = 1,7$  м/с;  $d = 0,43$  кг/кг.

высоты насадки приводит к росту коэффициента эффективности процесса теплообмена  $E$ . При этом максимальные значения  $E$  при высотах  $l = 0,11$  м и  $l = 0,155$  м практически одинаковы. Это свидетельствует о существовании максимального коэффициента эффективности теплообмена при оптимальном отношении  $l/d_{\text{ЭКВ}}$ , после которого значение  $E$  начинает падать.

Влияние влагосодержания и скорости ПГС на коэффициент эффективности теплообмена показано на рис. 3 и рис. 4. Увеличение  $d$  и  $W$  приводит к возрастанию максимального значения  $E$  на всем промежутке изменения их значений. Кроме этого, возрастает и коэффициент орошения, т.к. требуется большее количество охлаждающей жидкости для протекания процесса охлаждения и конденсации ПГС.

По графическим зависимостям рис. 2–4, имеющим явно выраженные максимумы, были определены значения коэффициента орошения ( $G/W$ ), соответствующие максимальному значению коэффициента эффективности теплообмена при различных начальных параметрах.

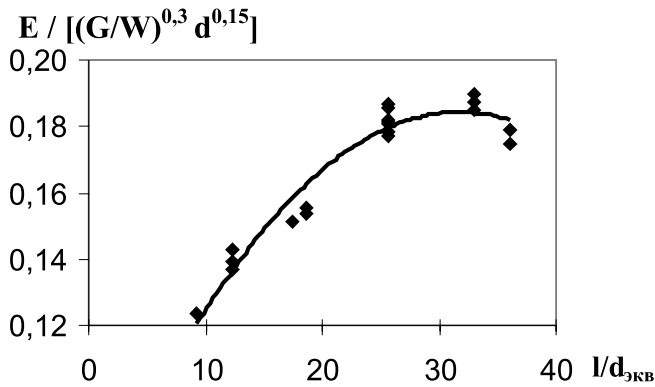
Обобщение полученных данных позволило получить графическую зависимость коэффициента эффективности теплообмена в контактном конденсаторе с сетчатой насадкой теп-

лоутилизационного контура ПГУ от коэффициента орошения, влагосодержания парогазовой смеси и геометрического фактора насадки для всего диапазона изменения  $l/d_{\text{ЭКВ}}$  (рис. 5) и функциональную зависимость для возрастающей области кривой при  $l/d_{\text{ЭКВ}} \leq 32$ .

$$E = \left(\frac{G}{W}\right)^{0,3} \cdot d^{0,15} \cdot \left(\frac{l}{d_{\text{ЭКВ}}}\right)^{0,388} \quad (2)$$

Из полученных зависимостей видно, что интенсивность теплообмена возрастает с увеличением геометрического фактора и достигает максимума при его величине около 30, а затем уменьшается. Граница эффективного использования конденсатора лежит в пределах изменения  $l/d_{\text{ЭКВ}} = 28-32$ . Дальнейшее увеличение геометрического фактора приводит к увеличению массогабаритных показателей аппарата при той же эффективности, что и при низких значениях  $l/d_{\text{ЭКВ}}$ .

В обобщенной зависимости отсутствуют величины, характеризующие теплофизические свойства контактирующих веществ и температурный фактор [3]. Это объясняется тем, что в эксперименте использовались только смесь водяного пара с воздухом и для охлаждения водопроводная вода. Начальные температурные параметры на входе теплоносителей не изменялись согласно



**Рис. 5. Обобщающая зависимость коэффициента теплообмена от геометрического фактора насадки.**

условиям моделирования процессов, происходящих в конденсаторе работающей ПГУ.

В отличие от работы [1] в обобщающую формулу было введено начальное влагосодержание парогазовой смеси. В наших опытах оно изменялось в диапазоне  $d = 0,29 - 1,5$  кг влаги/кг сух. возд. при  $W = 1,2 - 3,4$  м/с,  $G = 0,9 - 175$  т/(м<sup>2</sup>ч), а в работе [1]  $d = 0,11 - 0,13$  кг влаги /кг сух. возд.  $W = 1,1 - 2,3$  м/с,  $G = 8 - 15$  т/(м<sup>2</sup>ч). Более высокие скорости парогазового потока и плотности орошения объясняются использованием регулярных сетчатых насадок с малым гидравлическим сопротивлением, у которых более высокие скорости захлебывания по сравнению с насыпными. Кроме этого, сетчатые насадки обладают большей смоченной поверхностью при тех же геометрических факторах, что способствует повышению интенсивности теплообменных процессов, и тем самым смещается оптимум про-

цесса в сторону меньших значений геометрического фактора ( $l/d_{\text{ЭКВ}} = 35$  [1]).

По результатам представленной работы можно сделать следующие выводы:

1. На интенсивность процесса теплообмена существенное влияние оказывают факторы:  $W$ ,  $G$ ,  $d$ .

2. Имеется оптимальное значение  $l/d_{\text{ЭКВ}} = 30$ , при котором  $E$  имеет самое большое значение.

3. Получена обобщающая зависимость для определения  $E$ .

4. Подтверждено преимущество сетчатых насадок по сравнению с насыпными.

Полученная обобщенная зависимость для определения  $E$  может быть использована для проектирования и сравнения теплообменных аппаратов контактного типа. В дальнейшем планируется проведение исследований в различных температурных диапазонах, а также изменение геометрии насадки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дикий Н.А., Дубровская В.В., Шкляр В.И. Исследование контактного конденсатора для теплоутилизационного контура КГПТУ // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23. – № 4–5. – С. 81 – 83.

2. Пресич Г.А. Коэффициент эффективности теплообмена в контактных аппаратах // Промышленная теплотехника. – 1985. – Т. 7. – № 1. – С. 33–35.

Получено 03.10.2005 г.