

УДК 662.957

Фёдоров С.С., Губинский М.В., Шевченко Г.Л.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОМПАКТНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ НАСАДОК

### ВВЕДЕНИЕ

Областью применения регенеративных систем отопления на основе компактных насадок являются методические печи, нагревательные колодцы, котельные установки. Благодаря высокой тепловой эффективности, они широко распространены в развитых странах и в настоящее время постепенно внедряются на предприятиях Украины.

В качестве насадки для регенераторов такого рода систем используются, как правило, корундовые шарики диаметром 20 мм. Практика показывает, что доля затрат на корундовую насадку составляет до 30÷50 % от общей суммы затрат на регенеративную систему отопления. Таким образом, актуальным является вопрос о снижении затрат, связанных с приобретением насадки. Решение указанной проблемы возможно путём замены корунда альтернативным, более дешёвым материалом.

Эффективность использования насадок из других материалов уже рассматривалась ранее в работе [1]. Однако вопрос о методике выбора таких насадок по-прежнему остаётся до конца нераскрытым и требует изучения.

Целью проведенных исследований являлось получение практических данных о работе различных конструкций регенеративных насадок, способных заменить корундовые шарики, и разработка рекомендаций по их выбору.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве насадок (табл. 1) были рассмотрены корундовые, шамотные, чугунные шарики, чугунные полсферы, железорудные окатыши, шлак электропечи Никопольского ферросплавного завода, бой шамотного кирпича.

Таблица – 1 Характеристики регенеративных насадок

Материал насадки	Форма элемента насадки	Эквивалентный диаметр, мм	Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Порозность насадки	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Корунд	шарик	18,0 ÷ 23,0	3020	0,42	1752
Муллитокорунд	шарик	20,0 ÷ 28,0	2186	0,50	1104
Чугун	шарик	20,0 ÷ 29,0	7620	0,46	4115
	полусфера	14,1 ÷ 16,3	7852	0,47	4162
Шамотные шарики	шарик	22,0 ÷ 28,0	2463	0,50	1244
Бой шамотного кирпича	кусовая	27,0 ÷ 55,0	2478	0,54	1140
Железорудные окатыши	шарик	14,0 ÷ 17,5	4113	0,50	2077
Шлак электропечи	кусовая	23,0 ÷ 39,0	3170	0,49	1617

Исследования проводились на опытном стенде в лаборатории кафедры промышленной теплоэнергетики НМетАУ. Экспериментальная установка (рис. 1) включала в себя: регенеративную насадку 1, размещённую в теплоизолированной камере 2, горе-

лочное устройство для сжигания природного газа 3, нагнетатель воздуха типа ТГ-0,25 4, дымосос, систему трубопроводов для подвода и отвода газов, запорную и регулируемую арматуру 6-11, контрольно-измерительные приборы 12-18.

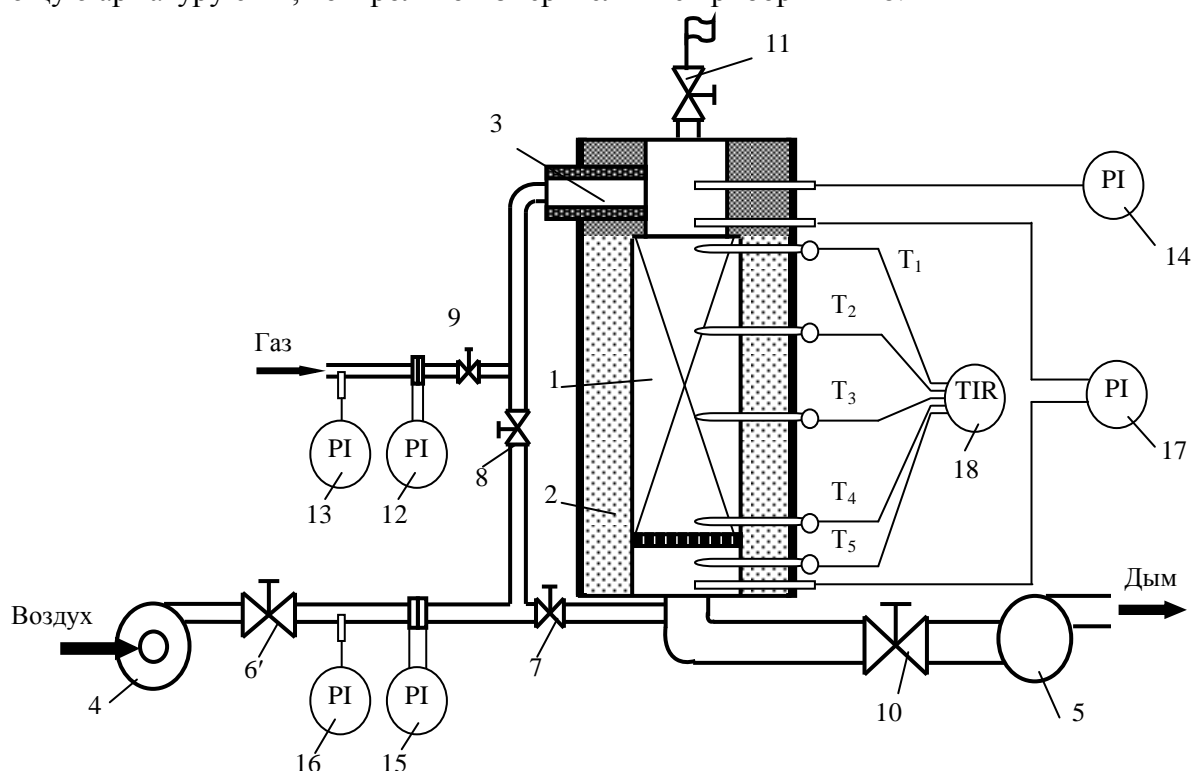


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

1 – насадка регенератора; 2 – тепловая изоляция; 3 – горелочное устройство; 4 – воздуходувка; 5 – дымосос; 6-11 – вентили; 12-17 – манометры; 18 – вторичный прибор для измерения температуры;  $T_1$ - $T_5$  – точки размещения термоэлектрических преобразователей

Характеристика исследованных конструкций насадок представлена в таблице 2.

Таблица – 2 Характеристика исследованных конструкций регенеративных насадок

№ п/п	Тип насадки	Высота слоя, м
1	корундовые шарики	0,55
2	верх: муллитокорундовые шарики	0,22
	низ: чугунные шарики	0,33
3	верх: муллитокорундовые шарики	0,22
	низ: чугунные полусферы	0,33
4	железорудные окатыши	0,55
5	шамотные шарики	0,55
6	шлак электропечи	0,55
7	верх: шамотные шарики	0,10
	низ: шлак электропечи	0,45
8	бой шамотного кирпича	0,55

В каждом эксперименте разогрев насадки регенератора осуществлялся из холодного состояния. Длительность периода между перекидками составляла 180÷200 с. Длительность самой перекидки не превышала 10 с. В дымовом периоде насадка нагревалась продуктами сгорания природного газа. Расход природного газа составлял 2,8÷3,3 м<sup>3</sup>/ч, коэффициент расхода воздуха на горение 1,62÷1,92, скорость дыма 0,45÷0,49 м/с, скорость воздуха в воздушном периоде 0,48÷0,54 м/с. Процесс завершался по достижении насадкой квазистационарного состояния.

В ходе экспериментов измерялись значения температур в слое насадки, расходы газа и воздуха, гидравлическое сопротивление насадки.

Сравнение работы насадок выполнялось по трём показателям: колебанию температуры подогрева воздуха за цикл, гидравлическому сопротивлению насадки и КПД установки (1):

$$\eta = \frac{V_B \cdot c_B \cdot \bar{t}_B \cdot \tau_B}{V_{\text{пг}} \cdot Q_{\text{нпг}}^p \cdot \tau_d} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где  $V_B$  – средний расход воздуха в воздушном периоде, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{\text{пг}}$  – средний расход природного газа в дымовом периоде, м<sup>3</sup>/ч;  $c_B$  – объёмная теплоёмкость нагретого воздуха, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $\bar{t}_B$  – средняя температура нагретого воздуха за период, °С;  $Q_{\text{нпг}}^p$  – низшая теплота сгорания природного газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $\tau_B$ ,  $\tau_d$  – длительность воздушного и дымового периодов, с.

Для каждой насадки определялся коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{w^2 \cdot \rho_0} \cdot \frac{273}{273 + t} \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление насадки, Па;  $w$  – скорость газа на пустое сечение камеры, м/с;  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – средняя температура газа в насадке, °С.

Коэффициент  $\xi$  является интегральной гидравлической характеристикой насадки, которая зависит от её высоты, формы, размеров элементов и порозности.

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Результаты исследований представлены в таблице 3 и на рисунках 2, 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта КПД установки

Конструкция насадки	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
КПД регенератора, %	83,7	82,6	83,0	91,4	84,7	75,1	83,1	73,3

Согласно полученным результатам (табл. 3), наибольшей тепловой эффективностью обладает насадка из железорудных окатышей № 4, а наименьшей – насадка из боя шамотного кирпича № 8. Это связано, главным образом, с размерами элементов наса-

док (табл. 1). Насадке с малым эквивалентным диаметром элементов соответствуют более интенсивный внешний теплообмен и развитая поверхность нагрева. Близкими по значению КПД являются насадки № 1-3, № 5, № 7.

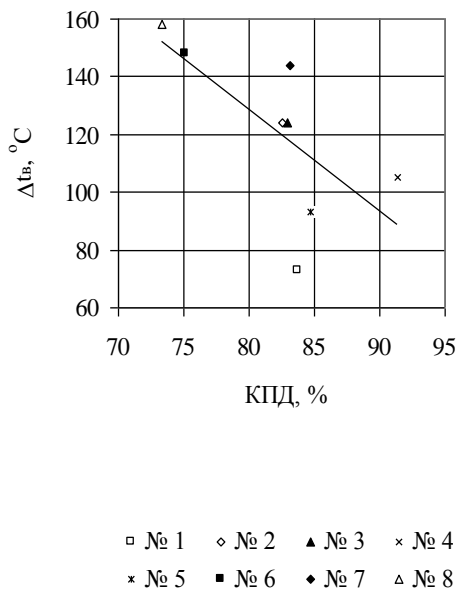


Рисунок 2 – Влияние тепловой эффективности насадки на колебание температуры подогрева воздуха за цикл

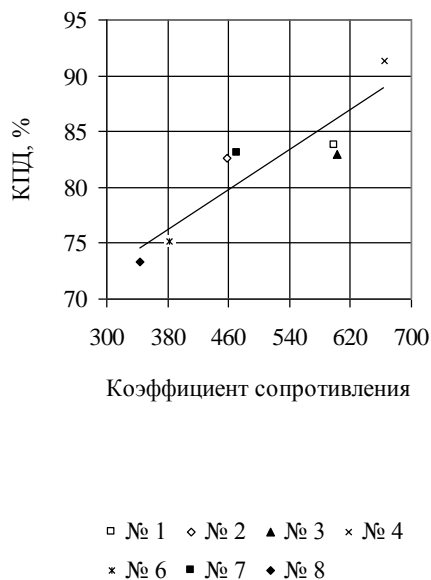


Рисунок 3 – Влияние коэффициента сопротивление насадки на КПД установки

Низкая тепловая эффективность насадки из шлака № 6 обусловлена усадкой слоя на 0,1 м: её высота в эксперименте составила 0,45 м. В области высоких температур работы насадки № 6 (900÷1200 °С) наблюдалось разрушение элементов. Поэтому эксперимент для данной конструкции насадки повторно не проводился.

Данные, представленные на рисунке 2, указывают на тенденцию снижения колебания температуры подогрева воздуха за цикл с увеличением тепловой эффективности работы насадки.

Определение коэффициента сопротивления  $\xi$  (2) осуществлялось для условий воздушного периода работы насадки, что повышало достоверность результатов.

Анализ влияния конструкции насадки на её тепловую эффективность и гидравлическое сопротивление (рис. 3) показал, что с увеличением коэффициента гидравлического сопротивления насадки тепловая эффективность установки повышается. Обработка данных, приведенных на рисунке 3, позволила получить вид регрессионной зависимости КПД установки от коэффициента гидравлического сопротивления насадки (3). Коэффициент корреляции  $R^2$  составил 0,81.

$$\eta = 59,4 + 4,45 \cdot 10^{-2} \cdot \xi, \% \quad (3)$$

Таким образом, критерием сравнения эффективности работы двух различных насадок, может выступать коэффициент гидравлического сопротивления.

### **ВЫВОДЫ**

Экспериментально установлено:

1. Альтернативные корундовым шарикам конструкции насадок, содержащие чугуны, шамотные, муллитокорундовые элементы, окатыши, шлак электросталеплавильной печи, позволяют эффективно нагревать воздух. Насадки из шлака электропечей следует комбинировать с огнеупорными элементами и размещать в низкотемпературной зоне (до 900 °С).

2. Имеет место тенденция снижения колебания температуры подогрева воздуха за цикл для насадок, работающих с большей тепловой эффективностью.

3. Критерием сравнения различных конструкций насадок, отличающихся по высоте, форме и размерам элементов, может выступать коэффициент гидравлического сопротивления насадки. При этом насадка с большим коэффициентом сопротивления, обладает большей тепловой эффективностью.

### **Литература**

1. Шевченко Г.Л., Губинский М.В., Хейфец Р.Г. Об использовании комбинированных насыпных насадок в регенеративных горелках // Теория и практика металлургии. – 2000. – № 5. – С. 11-13.

УДК 662.957

Федоров С.С., Губинский М.В., Шевченко Г.Л.

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОМПАКТНИХ РЕГЕНЕРАТИВНИХ НАСАДОК**

У статті надані результати експериментальних досліджень впливу конструкції насадки компактного регенератора на його показники роботи. За результатами досліджень встановлений взаємозв'язок між коефіцієнтом гідрравлічного опору насадки та ККД регенератора. Отримані результати можуть бути використані для вибору альтернативних конструкцій насадок.