

УДК 662.6.004.14

Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Саригло А.Г., Пресич Г.А., Слюсар М.А.*Институт технической теплофизики НАН Украины***ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Викладено особливості створення теплоутилізаційних технологій для скловарних печей. Запропоновано ефективно устаткування для корисного використання скидної теплоти димових газів та показана доцільність їхнього застосування.

Изложены особенности создания теплоутилизационных технологий для стекловаренных печей. Предложено эффективное оборудование для полезного использования сбросной теплоты дымовых газов и показана целесообразность его применения.

The features of heat recovery technologies at glass-worked furnaces are set out. An efficient equipment for heat recovery utilization of waste gas is introduced, as well as the expediency its application is demonstrated.

Одной из наиболее энергоемких отраслей народного хозяйства является стекольная промышленность [1, 2]. При этом, большинство стекловаренных печей оснащено воздухогрейными утилизаторами теплоты уходящих газов – регенераторами и рекуператорами. В данных устройствах за счет охлаждения газов осуществляется подогрев воздуха, подаваемого в горелки печи. Однако, температура отходящих газов после воздухогрейных устройств остается еще достаточно высокой (300...600 °С, а в некоторых случаях достигает 800 °С) и тепловые потери с газовыми выбросами составляют в среднем 40...60 %. Поэтому проблема повышения КПД и эффективное использование топлива в стекловаренных печах являются весьма актуальными [3-5].

Целью данной работы являлось создание технологий и оборудования для повышения эффективности использования теплоты топлива в печах стекольного производства.

Рациональной схемой полезного использования сбросной теплоты дымовых газов является применение теплоутилизационных устройств для получения горячей воды. Следует отметить, что реализация данной схемы связана с определенными трудностями, которые обусловлены целым рядом особенностей стекловаренных печей различного назначения и, в частности, со значительным технологическим выносом в виде пыли и химически агрессивных газообразных соединений в дымовых газах. Дымовые газы указанных печей в основ-

ном состоят из газов, образующихся при сжигании топлива в процессе плавления шихты, то есть, от химических реакций, протекающих в это время. В составе смесей очень агрессивны сернистые газы, оксиды азота, менее агрессивны кислород, оксиды углерода, пыль. В таблице 1 представлены характерные данные относительно газовых выбросов стекловаренных печей, полученные в результате собственных исследований и анализа литературы.

Как видно из представленной таблицы, в таких условиях необходимо применение специальных теплоутилизационных технологий, позволяющих:

- уменьшать концентрацию пыли в дымовых газах перед поступлением их в теплоутилизаторы;
- способствовать уменьшению заносом пылью теплообменной поверхности теплоутилизаторов;
- не допускать конденсации влаги на теплообменной поверхности;
- обеспечивать доступ к теплообменным поверхностям для их очистки;
- минимизировать трудозатраты на очистку.

При этом теплоутилизаторы должны быть достаточно компактными и высокоэффективными в тепловом отношении.

При разработке технических решений теплоутилизаторов учитывались особенности стекловаренных печей и, в частности, тот факт, что пылевые частицы, содержащиеся в дымо-

Табл. 1. Параметры газовых выбросов стекловаренных печей

Наименование характеристики, единица измерения	Предприятия стекольной промышленности, на которых проведены исследования				Литературные источники	
	ООО "ЧСЗ- Липецк"	ОАО "Ветропак Гостомельский стеклозавод"	ООО "Херсонский завод стеклоизделий"	ООО "Львов- ский мехзавод"		
Температура отходящих газов, °С	400	360	330	450		
Расход природного газа, м ³ /час	2300	1400	430	600		
Состав технологического выноса в отходящих газах, мг/м ³ :					Стандарты	
					Гер- мании	США
сернистый ангидрид	150	1150	86	220	1800	250
оксиды азота	4000	1300	1600	1400	1000	2700
пыль	160...218	200...300	120...220	140...180	50	100
оксид углерода	0	0	0	0	0	100
Коэффициент избытка воздуха	1,56	1,7	1,6	1,8		
Дисперсный состав пыли, %:						
0...10 мкм		41,75				
10...20 мкм		15,64				
20...30 мкм		15,38				
40...30 мкм		10,99				
60...70 мкм		7,08				
80...200 мкм		4,36				
Концентрация пыли (мг/м ³) в от- ходящих газах для печей:					по данным [6]	
Производства тарного стекла	150...220		120...220		87...479	
Производства листового стекла				140...180	98...199	
Подковообразных	150...220				252...337	
Прямого нагрева					149	
С поперечным направлением пламени		200...300			199...251	

вых газах, оседая на поверхности нагрева, за короткий период (от нескольких суток до нескольких недель) существенно уменьшают теплопроизводительность утилизационных уста-

новок, зачастую снижая их эффективность в несколько раз. Толщина отложений твердого технологического уноса определяется химическим, дисперсным и количественным составом

пыли. Эксплуатация теплоутилизационного оборудования в таких условиях возможна при применении пылеосадительных устройств и системы очистки поверхностей нагрева. Также, на теплообменной поверхности указанного оборудования в результате коррозии появляются рыхлые пленки, образованию которых способствует восстановительная среда [6].

При учете данных обстоятельств институтом разработаны различные технические решения и ряд конструкций теплоутилизаторов газотрубного и водотрубного типов. Эти теплоутилизаторы предназначены для получения горячей воды с температурой до 95 °С, которая в зимний период может использоваться для отопления производственных помещений, а в летнее время направляться в систему горячего водоснабжения и технологические нужды.

В качестве теплообменной поверхности теплоутилизатора газотрубного типа выбраны трубы с кольцевыми турбулизаторами на внутренней стороне (рис. 1), позволяющие интенсифицировать теплообмен со стороны газов и соответственно уменьшать габариты и металлоемкость теплоутилизатора по сравнению с гладкотрубными конструкциями.

Известно [7, 8], что теплоотдача и гидравлическое сопротивление в трубах с кольцевыми интенсификаторами теплообмена существенно зависят от параметров накатки турбулизаторов. При определенных параметрах накатки ($d/D = 0,906$, $t/D = 1,050$) для чисел Рейнольдса, соответствующих рабочим режимам ($Re = 10000 \dots 15000$), коэффициент теплоотдачи внутри труб повышается в среднем в 2 раза и наблюдается опережение роста теплоотдачи в сравнении с ростом гидравлического сопро-

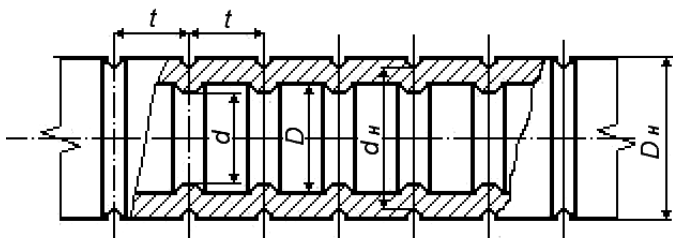


Рис. 1. Труба с кольцевыми турбулизаторами (ТКТ).

тивления. Указанные параметры были использованы при создании экспериментальных моделей газотрубного теплоутилизатора дымовых газов. Эти модели являлись теплообменниками кожухотрубчатого типа с движением газов внутри труб и водой в межтрубном пространстве. Исследовались модели с трубами гладкими и с кольцевыми турбулизаторами. Исследования проводились с целью определения средних коэффициентов теплообмена и аэродинамического сопротивления, а также изучения их динамики во времени при использовании для запыленных газов стекловаренных печей.

На рис. 2 представлен график изменения во времени коэффициента загрязнения ψ_3 [9] экспериментальных моделей с ТКТ и гладкими трубами. Коэффициент ψ_3 представляет собой отношение коэффициентов теплопередачи загрязненного трубного пучка по сравнению с чистой поверхностью.

Как видно из представленного графика, через 100 часов работы коэффициент теплопередачи теплообменника с ТКТ уменьшается примерно на 50 %, а далее величина его стабилизируется. Немного иная динамика ψ_3 для модели с гладкими трубами, что свидетельствует о меньшей интенсивности загрязнения поверхности гладких труб по сравнению с трубами ТКТ. Последнее подтверждается и данными, представленными на рис. 3, полученными при определении аэродинамического сопротивления описанных моделей.

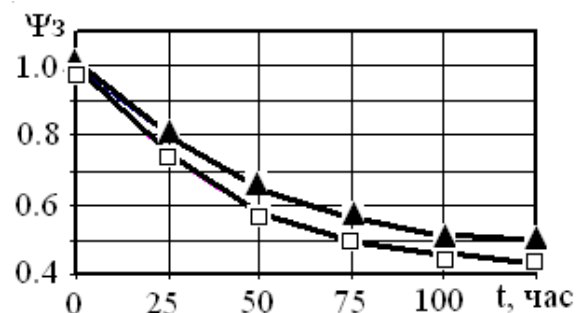


Рис. 2. Изменение во времени коэффициента загрязнения ψ_3 экспериментальных моделей: □ – трубы с кольцевыми турбулизаторами; ▲ – гладкие трубы.

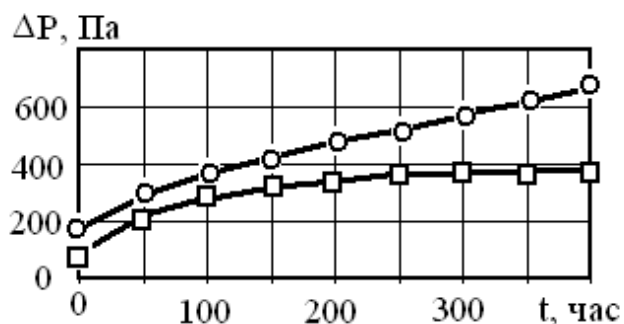


Рис. 3. Изменение во времени аэродинамического сопротивления экспериментальных моделей:

□ – гладкие трубы; ○ – трубы с кольцевыми турбулизаторами.

Однако, как показывают расчеты и исследования, несмотря на меньшую (до 15 %) загрязняемость рабочей поверхности гладких труб, общая тепловая эффективность поверхностей нагрева с ТКТ выше примерно на 50...70 %.

Для условий работы в среде запыленных газов стекловаренных печей экспериментально

установлены оптимальные скорости очистительного агента (воздуха) $v_{\text{опт}}$ в зависимости от длины l теплообменных труб в диапазоне ее изменения от 1 до 2,5 м.

Полученные данные обработаны в виде зависимости

$$v_{\text{опт}} = 35 \cdot l^{0,5}.$$

С учетом полученных данных были разработаны технические решения газотрубных конструкций теплоутилизаторов для чистых и запыленных газов.

На рис. 4 представлена принципиальная схема теплоутилизатора газотрубного (ТГ) дымовых газов печей. ТГ применяется как для чистых, так и запыленных дымовых газов. Газотрубный теплоутилизатор (см. рис. 4) включает в себя собственно теплообменник 1, состоящий из труб 2 с кольцевыми турбулизаторами, входную 3 и выходную 4 газовые камеры и систему очистки 5. Технические характеристики теплоутилизатора приведены в таблице 2.

При использовании теплоутилизатора ТГ

Табл. 2. Технические характеристики теплоутилизатора газотрубного ТГ

Наименование показателя, размерность	Значение
Теплопроизводительность, МВт	0.3...1.2
Температура воды, °С:	
на входе	70
на выходе	95
Температура газов, °С:	
на входе	450
на выходе	130...200
Аэродинамическое сопротивление, Па	450...600
Гидравлическое сопротивление, кПа	5
Расход газов, кг/с	1.0...3.5
Расход воды, кг/с	1.6...6.5
Габаритные размеры, мм:	
диаметр корпуса	815...1480
высота теплообменника	1500...2000
общая высота	3070...4670
Масса, кг	1320...5030

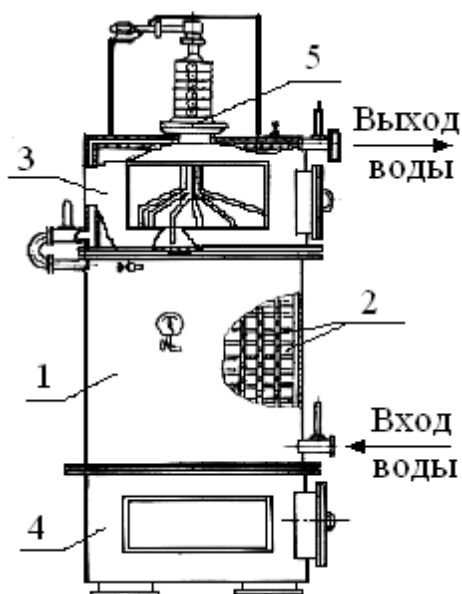


Рис. 4. Схема теплоутилизатора газотрубного ТГ с системой очистки поверхностей нагрева.

для стекловаренных печей на поверхности теплообмена с газовой стороны образуются рыхлые отложения пыли. Для удаления пылевых отложений разработана система очистки с помощью сжатого воздуха. Применение очистки позволяет периодически удалять технологический унос с внутренней стороны труб в автоматическом режиме сжатым воздухом давлением 0,5 МПа в процессе работы теплоутилизатора.

Эффективность очистки в процессе эксплуатации теплоутилизатора проиллюстрирована на рис. 5. Как видно из приведенного графика, после очистки коэффициент теплопередачи практически восстанавливается до первоначального значения.

Кроме описанных газотрубных теплоутилизаторов разработаны также теплоутилизаторы водотрубные, предназначенные преимущественно для использования теплоты отходящих газов печей для производства стеклянной тары. Эти печи характеризуются большим расходом газа на горение.

Теплоутилизаторы компонуются с определенным числом модулей. Теплообменная поверхность каждого модуля для уменьшения отложений пыли состоит из панелей, образо-

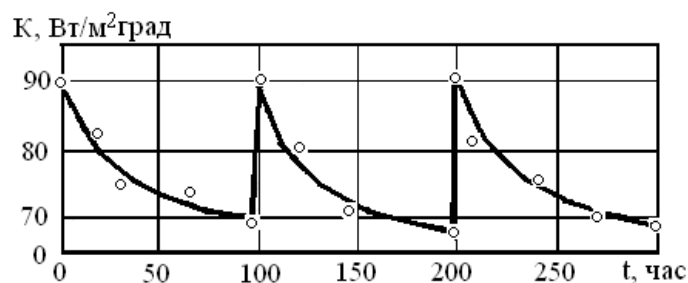


Рис. 5. Изменение коэффициента теплопередачи теплоутилизатора газотрубного с системой очистки в процессе эксплуатации.

ванных трубами с мембранами. Теплоутилизаторы водотрубные модульные (ТВМ) разработаны для печей с расходом природного газа от 400 до 2000 м³/ч.

В качестве примера можно привести реализацию разработанной теплоутилизационной технологии с применением ТВМ на ООО "Чагодощенский стекольный завод" (Российская Федерация). За стекловаренной печью указанного предприятия сооружена теплоутилизационная установка, предназначенная для нагрева воды системы отопления завода за счет использования теплоты отходящих газов. Теплоутилизационная установка содержит два идентичных модульных теплоутилизатора (рис. 6), установленных параллельно основному газоходу печи. В конструкции модулей предусмотрены люки для очистки теплообменных поверхностей от загрязнений технологическим уносом. Удаление загрязнений проводится сжатым воздухом в ручном режиме. Периодичность удаления отложений пыли определяется условиями эксплуатации (наличием пылесадительных устройств, степенью содержания в газах твердых частиц, их дисперсным составом и так далее).

Технические характеристики теплоутилизаторов, полученные при испытаниях, приведены в табл. 3.

На рис. 7 представлен график зависимости теплопроизводительности ТВМ, установленного за стекловаренной печью ОАО "Гостомель-

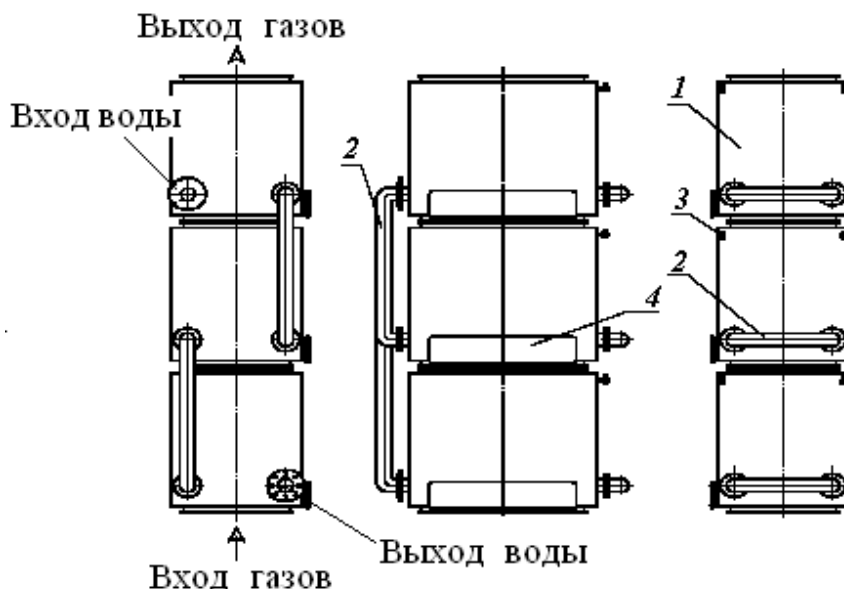


Рис. 6. Теплоутилизатор водотрубный модульный ТВМ:
 1 – модуль теплоутилизатора; 3 – кран для удаления воздуха;
 2 – соединительные трубопроводы; 4 – люки для очистки.

Табл. 3. Технические характеристики теплоутилизаторов ТВМ

Наименование характеристики, единица измерения	Значения в режимах работы теплоутилизаторов		
	Теплоутилизатор №1	Теплоутилизатор №2	Совместная работа двух теплоутилизаторов
Теплопроизводительность, МВт	0,23	0,23	0,73
Расход воды, кг/с (т/час)	16,7 (60)	16,7 (60)	16,7 (60)
Температура воды на входе, °С	80,9	80,3	57,7
Температура воды на выходе, °С	77,6	77,0	68,2
Расход газов, кг/с	1,1	1,0	2,5
Температура газов на входе, °С	315	331	390
Температура газов на выходе, °С	116	119	120
Аэродинамическое сопротивление, Па	140	140	260
Гидравлическое сопротивление, кПа	140	140	50

ский стекловод", от времени его эксплуатации между очистками.

Рекомендуемая периодичность очистки около двух недель. За этот период теплопроизводительность утилизационной установки уменьшается примерно на 30 %. После удаления

пылевых отложений тепловая эффективность повышается практически до первоначального значения. Для других печей интенсивность засорения поверхностей нагрева и периодичность очистки может существенно отличаться от приведенных данных.



Рис. 7. Изменение теплопроизводительности ТВМ в процессе эксплуатации.

В заключение отметим, что применение теплоутилизаторов ТГ и ТВМ обеспечивает повышение коэффициента использования теплоты топлива на 10...25 %. При этом срок окупаемости затрат на теплоутилизацию не превышает 1 года.

Разработанные устройства эксплуатируются на 11 заводах Украины и Российской Федерации. Полезное использование потенциала тепловых выбросов печей позволяет указанным предприятиям полностью обеспечить потребность в тепловой энергии на собственные нужды и за счет этого отказаться от услуг котельной. В то же время, на некоторых заводах имеются излишки утилизированной теплоты (особенно в летний период), что позволяет продавать избыточную тепловую энергию стороннему потребителю.

Выводы

Таким образом, предложенные теплоутилизационные технологии и соответствующее оборудование существенно (до 25 %) позволяет повысить эффективность использования

топлива в стекловаренных печах и использовать утилизированную теплоту в системах теплоснабжения предприятий стекольного производства и других потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюзер В.Я. Совершенствование технических характеристик стекловаренных печей // Стекло и керамика. – 2008. – №7. – С.58-59.
2. Рей Д. Экономия энергии в промышленности / Справочное пособие для инж.-техн. работников. Перевод с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
3. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, №4. – С. 78-85.
4. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Пресич Г.А., Саригло А.Г., Чехаровская М.И. Экономия топлива путем утилизации теплоты отходящих дымовых газов стекловаренных печей // Стекло мира. – 2001. – №3. – С.58-59.
5. Филлипов О.В. Теплообменные устройства печных установок. – Киев: Вища школа, 1978. – 220 с.
6. Шапилова М.В. Тимофеева И.Т. Охрана атмосферного воздуха в стекольной промышленности. – М.: Легпропромиздат, 1992. – 231 с.
7. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М: Машиностроение, 1981. – 206 с.
8. Аронов И.И. Верфоломеев И.М., Гомон В.И. и др. /а.с. СССР 612142. Теплообменная труба. – опубли. в Б.И. , 1978, – №23.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов под редакцией Кузнецова Н.В., Нормативный метод // – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

Получено 27.09.2010 г.