

ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.3.036

А. П. НЕСЕНЧУК, д-р техн. наук,
М. Г. ПШОНИК, канд. техн. наук (БНТУ),
Т. В. РЫЖОВА, канд. техн. наук (РУП «МАЗ»),
Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПРОМЫШЛЕННЫЙ УНИФИЦИРОВАННЫЙ РЕКУПЕРАТОР НА БАЗЕ МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ «СИЛАЛ» М-I 115×460×860-05 И «СИЛАЛ» М-II 230×460×860-1,0 (ТИПОРЯД М-I И М-II)

Технологический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{техн}}$ печей заготовительного и механосборочного производств машиностроительных и автотракторных предприятий Республики Беларусь сегодня (за редким исключением) составляет 5–15 %. Как показывает анализ, при регенеративном теплоиспользовании он должен быть равен 35–37 %. С учетом внешнего (утилизационного) теплоиспользования при комбинированной схеме величина КПД может доходить до

$$\eta_{\text{эн}} = (Q_1 + Q_{\text{доп}} / BQ_{\text{н}}^{\text{р}}) \approx 40 - 65 \%,$$

где $Q_1 / BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$ – технологический коэффициент полезного действия высокотемпературной установки (нагревательная или термическая печь); $Q_{\text{доп}}$ – дополнительное количество теплоты, полученное от тепловых ВЭР в устройстве для внешнего теплоиспользования (утилизационная установка); $\eta_{\text{эн}}$ – энергетический КПД высокотемпературной установки, работающей по комбинированной схеме те-

плоиспользования; Q_1 – теплота, затраченная на нагрев садки перед горячим формообразованием или термообработкой.

Как видим, внедряя схему с регенеративным (внутренним) теплоиспользованием (подогрев воздуха-окислителя органического топлива), можно сократить удельные затраты топлива в заводских теплотехнологиях нагрева на 10–15 %, помня, что подогрев окислителя до 100 °С позволяет снизить затраты теплоты в среднем на 5 %, а при нагреве до 200–250 °С – на 15 %. При этом достоверно установлено, что основной вклад в мероприятия по снижению удельного расхода органического топлива в теплотехнологии при регенеративной схеме принадлежит подогреву воздуха-окислителя в металлических теплообменниках рекуперативного типа.

К сожалению, используемые на печах заготовительного и механооборочного производств заводов машиностроительного и автотракторного профилей рекуператоры имеют ряд недостатков технологического и конструкторского характера, что ограничивает их применение, создавая предпосылки для игнорирования регенеративного теплоиспользования. К таким недостаткам металлических рекуператоров следует отнести:

- ограниченное внедрение трубчатых металлических промышленных рекуператоров в высокотемпературных теплотехнологиях машиностроительных и автотракторных заводов, что связано, в первую очередь, с отсутствием возможности его изготовления в условиях конкретного промышленного предприятия. Дело в том, что трубки рекуператора должны быть изготовлены из жаропрочной стали и выдерживать рабочую температуру порядка 700–900 °С. Такую сталь в условиях завода можно изготовить в электропечах. Однако на этом возможности изготовления заканчиваются, так как получить трубчатые элементы рекуператора из этой стали не представляется возможным без наличия трубопрокатного стана. Жаропрочные трубы приходится покупать на стороне, что связано с многими трудностями;

- отказ от стального трубчатого рекуператора (а он исключительно конструктивен и технологичен), обладающего высокой газоплотностью воздушного тракта и пониженной металлоемкостью в сравнении с другими металлическими рекуператорами, к примеру чугунными, имеет лишь одно альтернативное решение – использование чугунного рекуператора, производимого из вторичного (ваграночного) металла.

Такой рекуператор имеет очень много недостатков – это низкая газоплотность воздушного тракта и большая металлоемкость, недостатки эксплуатационного плана (засоряемость поверхности теплообмена окалиной, нетехнологичность сборки).

В итоге к недостаткам, присущим исключительно лишь чугунным рекуператорам, можно отнести:

- низкую газоплотность, присущую всем жестким металлоконструкциям. При нагреве отдельных жестко связанных между собой элементов поверхности нагрева до 600 °С в результате неоднородности условий работы и жесткости конструкции в целом возникают чрезмерные напряжения, нарушается газоплотность воздушного тракта на многих (подавляющем большинстве) участках поверхности теплообмена. При этом до 30–40 % воздуха-окислителя направляется в дымовой тракт рекуператора, повышая энергоемкость нагрева;

- нетехнологичность сборки и плохие эксплуатационные характеристики, вызванные загрязнением поверхности теплообмена со стороны продуктов сгорания. Они приводят к нарушению первоначальной схемы теплообмена, что выражается в снижении коэффициента теплопередачи с 30–40 до 6–10 Вт/(м² · К). Механизм теплопередачи, лимитируемый теплоотдачей на горячей и холодной сторонах α_1 и α_2 ($k = \alpha_1\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2)$), теперь уже управляется термическим сопротивлением теплопроводности загрязняющего насоса окалины, полностью исключая определяющее влияние на теплообмен R_{α_1} и R_{α_2} .

Однако, несмотря на, казалось бы, неустранимые и очень серьезные недостатки чугунного рекуператора, сегодня он остается единственным вариантом внедрения на промышленном предприятии регенеративного теплоиспользования тепловых отходов (продукты сгорания органического топлива на выходе из рабочего пространства печи) промышленных нагревательных и термических печей. В основу мероприятий по внедрению чугунного рекуператора положено его единственное достоинство – возможность изготовления в условиях завода с использованием ваграночного (вторичного) модифицированного чугуна и отливкой в заводскую.

форму. Модифицированный жаростойкий и жаропрочный чугун получается за счет добавки в него до 7 % кремния (силал). При этом возможность изготовления промышленного рекуператора непосредственно в заводских условиях полностью решает вопрос в пользу выбора чугунной конструкции. Остается решить проблемы, связанные с общеизвестными недостатками такой конструкции.

Авторами разработан чугунный рекуператор (рис. 1), в котором ранее отмеченные недостатки устранены. По принципу составного металлического литейного кокиля, собранного из большого числа малых элементов взамен массивного литого, поверхность теплообмена авторы представили свободными (не заземленными) многочисленными элементами-модулями (всего предложено две разновидности модулей: «Силал» М-I 115×460×860-05 и «Силал» М-II 230×460×860-1,0). Из этих многочисленных модулей собирается поверхность теплообмена. Как и каждый модуль в отдельности, рекуператор в сборе (поверхность теплообмена) не заземлен и при нагреве может перемещаться по направляющим (склизам), не вызывая при этом напряжений ни в модулях, ни в сборной конструкции. Холодный и горячий коллекторы воздуха также могут перемещаться свободно в любом направлении (рис. 2). Свободное размещение модулей и коллекторов (а равно и всей конструкции) обеспечивает начальную (исходную) газоплотность в процессе эксплуатации промышленного рекуператора.

Для рекуператоров любой тепловой производительности (типоряд по температуре подогрева воздуха: 100; 150; 200; 250 (300) °С и производительности печи по садке: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 (4,0) и 6,0 т/ч) предлагается только два модуля: М-I («Силал» М-I 115×460×860-05) и М-II («Силал» М-II 230×460×860-1,0). Модули соответственно состоят из двух и четырех унифицированных чугунных элементов, которые должны изготавливаться в виде мелких серий на специализированном участке ориентированного для этих целей промышленного предприятия республики. Сборка модулей выполняется на «мягкой» газоплотной сборке типа МКРВ, исключая нарушение газоплотности в пределах как модуля (М-I и М-II), так и конструкции в собранном виде.

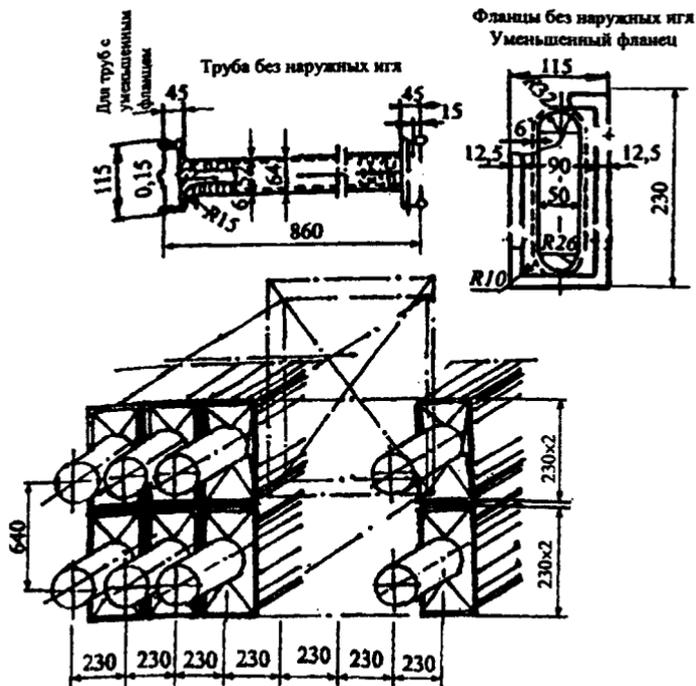


Рис. 1. Общий вид модульного унифицированного промышленного рекуператора (модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

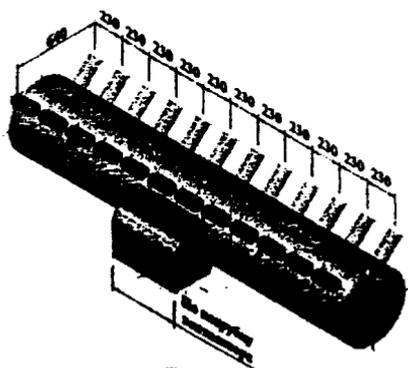


Рис. 2. Общий вид горячего (холодного) коллектора унифицированного промышленного рекуператора (модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

Сборка модулей М-I и М-II в единое целое достигается с помощью горячего и холодного коллекторов (рис. 2). Нужно заметить, что коллекторы холодного и нагретого воздуха конструктивно не отличаются и взаимозаменяемы (различие наблюдается только в пределах модулей М-I и М-II). Более того, конструкция коллекторов позволяет изменить компоновку поверхности нагрева в части числа ходов (одно- и многоходовой рекуператор). Компоновка рекуператора из модулей М-I и М-II также позволяет обеспечить скорость продуктов сгорания в рекуператоре на уровне 0,5–2,0 м/с, что в свою очередь устраняет немаловажный недостаток рекуператора, обусловленный высоким гидромеханическим сопротивлением дымового тракта (при числе рядов труб $n > 4$).

Модули поверхности теплообмена «Силал» М-I 115×460×860-05 и «Силал» М-II 230×460×860-1,0 выполнены без оребрения со стороны большего значения коэффициента теплоотдачи (продукты сгорания топлива), что увеличивает проходное сечение газового тракта, снижает вероятность загрязнения поверхности окалиной и улучшает условия ее периодической чистки дробеструйным аппаратом или механическими щетками. Оребрение выполнено только на воздушной стороне элементов модулей М-I и М-II (трапециевидное либо треугольное продольное ребро).

Итак, конструкция унифицированного чугунного рекуператора собирается из свободно покоящихся модулей, которые не защемлены по отношению друг к другу, а также холодному и горячему коллекторам, свободно покоящимся на специальных каркасных опорах, что позволяет выполнять сочленения коллектора и модуля путем сварки или с помощью специальных соединительных элементов (рис. 3), обеспечивающих газоплотность при температурах до 400 °С включительно (нагретый же воздух имеет температуру на уровне 250–300 °С).

Как видно, гидродинамическое сопротивление соединительных элементов (рис. 3) по величине не превышает сопротивление трения поверхности с литейной шероховатостью.

Работа воздушного тракта (скорость воздуха-окислителя – 4–7 м/с) обеспечивается высоконапорным (как обычно) вентилятором ВР-12-26 или В-Ц6-28 (рис. 4).



Рис. 3. Соединительный патрубок унифицированного промышленного рекуператора (модуль I, «Силал» М-I 115×460×860-05 и модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

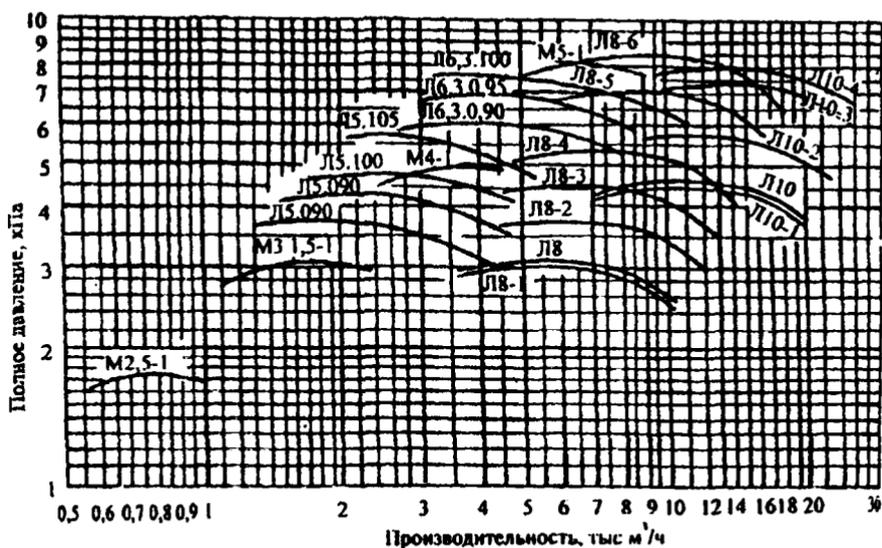


Рис. 4. Характеристика вентиляторов высокого давления (ВР-12-26 и В-Ц6-28) для модульного унифицированного промышленного рекуператора (модуль I, «Силал» М-I 115×460×860-05 и модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

Электропривод к вентиляторам ВР-12-26 (В-Ц6-28) приведен в табл. 1.

Таблица 1. К выбору электрического привода к вентиляторам ВР-12-26 и В-Ц6-28 [1, 2]

Обозначение	Вентилятор			Двигатель			Масса вентилятора (с двигателем), кг
	Номер	Диаметр колеса $D_{ном}$, %	Частота вращения $n_{дв}$, мин ⁻¹	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения $n_{дв}$, мин ⁻¹	
1	2	3	4	5	6	7	8
Вентиляторы ВР-12-26 (исполнение 1)							
M2,5-1a	2,5	—	2810	4A71A2	0,75	2810	55,7
M2,5-1б			2810	4A71B2	1,1	2810	55,7
M2,5-1в			2810	4A80A2	1,5	2810	58,3
M3,15-1a	3,15	—	2840	4A80B2	2,2	2840	74,3
M3,15-1б			2840	4A90L2	3	2840	83
M3,15-1в			2840	4A100S2	4	2840	90
M4-1a	4	—	2905	4A112M2	7,5	2905	156
M4-1б			2905	4A132M2	11	2905	195
M5-1a	5	—	2940	4A180S2	22	2940	340
M5-1б			2940	4A180M2	30	2940	360
M5-1в			2940	4A200M2	37	2940	430
Вентиляторы В-Ц6-28 (исполнение 1)							
Л5.090-1a	5	90	2850	АИР90L2	3	2850	103
Л5.090-1б			2850	АИР100S2	4	2850	109
Л5.090-1в			2850	АИР100L2	5,5	2850	115
Л5.090-1г			2895	АИР112M2	7,5	2895	131
Л5.095-1a		95	2850	АИР100S2	4	2850	109
Л5.095-1б			2850	АИР100L2	5,5	2850	115
Л5.095-1в			2895	АИР112M2	7,5	2895	131
Л5.100-1a		100	2850	АИР100L2	5,5	2850	11
Л5.100-1б			2895	АИР112M2	7,5	2895	131
Л5.100-1в			2910	АИР132M2	11	2910	157
Л5.105-1a		105	2895	АИР112M2	7,5	2895	131
Л5.105-1б			2910	АИР132M2	11	2910	157
Л6,3.090-1a	6,3	90	2910	АИР132M2	11	2910	226
Л6,3.090-1б			2910	АИР160S2	15	2910	272
Л6,3.090-1в			2910	АИР160M2	18,5	2910	287
Л6,3.090-1г			2925	АИР180S2	22	2925	305

1	2	3	4	5	6	7	8		
Л6,3.095-1а		95	2910	АИР132М2	11	2910	226		
Л6,3.095-1б			2910	АИР160S2	15	2910	272		
Л6,3.095-1в			2910	АИР160М2	18,5	2910	287		
Л6,3.095-1г			2925	АИР180S2	22	2925	305		
Л6,3.100-1а		100	2910	АИР160S2	15	2910	272		
Л6,3.100-1б			2910	АИР160М2	18,5	2910	287		
Л6,3.100-1в			2925	АИР180S2	22	2925	305		
Л6,3.100-1г			2925	АИР180М2	30	2925	325		
Л8-а	8		1460	4А132М4	11	1460	375		
Л8-б			1465	4А160S4	15	1465	417		
Л10-а	10	-	1470	4А180М4	30	1470	685		
Л10-б				1475	4А200М4	37	1475	760	
Вентиляторы В-Ц6-28 (исполнение б)									
Л8-1а	8	-	1430	4А132М4	11	1460	635		
Л8-1б			1430	4А160S4	15	1465	677		
Л8-2а			1600	4А160S4	15	1465	685		
Л8-2б			1600	4А160М4	18,5	1465	720		
Л8-3а			1750	4А160М4	18,5	1470	740		
Л8-3б			1750	4А180S4	22	1470	760		
Л8-4а	8	-	1900	4А180S4	22	1470	740		
Л8-4б			1900	4А180М4	30	1470	760		
Л8-5а			2200	4А200М4	37	1475	855		
Л8-5б			2200	4А200L4	45	1475	895		
Л8-6а			2400	4А200L4	45	1475	895		
Л8-6б			2400	4А225М4	55	1480	940		
Л10-1а			10	-	1440	4А180М4	30	1470	915
Л10-1б					1440	4А200М4	37	1475	990
Л10-2а	1600	4А200М4			37	1475	1000		
Л10-2б	1600	4А200L4			45	1475	1040		
Л10-2в	1600	4А225М4			55	1475	1085		
Л10-3а	1800	4А225М4			55	1475	1095		
Л10-3б	1800	4А250S4			75	1480	1230		
Л10-4а	1875	4А225М4			55	1475	1095		
Л10-4б	1875	4А250S4			75	1480	1230		

Следует отметить, что предлагаемый промышленный рекуператор собирается только из двух модулей поверхности теплообмена М-I и М-II, что делает его унифицированным для всех без исключения высокотемпературных установок (печей, сушил и т. п.) Республики Беларусь, создает предпосылки для организации изготовления централизованного промышленного рекуператора (модули «Силал»

М-I 115×460×860-05 и «Силал» М-II 230×460×860-1,0), имеющего типоряд по температуре: 100; 150; 200; 250 (300) °С и по производительности оборудования (промышленной печи): 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 (4,0) и 6 т/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет нагревательных и термических печей / С. Б. Василькова [и др.]; под ред. В. М. Тымчака, В. Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983.
2. Справочник конструктора печей прокатного производства: в 2 т. / А. И. Бергауз [и др.]; под ред. В. М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1970.

УДК 669.041

А. П. НЕСЕНЧУК, д-р техн. наук,
Р. Б. ВАЙС, канд. техн. наук,
Д. В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ),
Т. В. РЫЖОВА, канд. техн. наук (РУП «МАЗ»),
А. В. МАТОЧКИН (ОАО «Завод "ЛЕГМАШ"»),

К ВЫБОРУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Лучистый теплообмен осуществляется между первым излучателем (факел, газы, электронагреватель) и вторичным – керамической футеровкой и поверхностью нагреваемой садки. При этом существует представление о том, что нагреваемые материалы получают эту сумму теплоты «от печи», т. е. печь и есть первоисточник теплоты. Таким образом, возникло новое понятие о температуре печи $T_{\text{печ}}$. Ясно, что в этом случае обобщенный излучатель (печь) суммирует теплопередачу излучением как действительного первоисточника энергии (факела, газов, электронагревателя), так и вторичного излучателя – футеровки. Печи приписывают свойство абсолютно черного тела как замкнутого пространства. Следовательно, температурой печи нужно называть температуру такого абсолютно