

УДК 621.3.036

**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)**

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**, канд. техн. наук **МАНДЕЛЬ Н. Л.**,  
инженеры **ШИШКОВ В. Н.**, **НОВГОРДОВА Г. С.**,  
канд. техн. наук **РЫЖОВА Т. В.**, канд. техн. наук, доц. **ПШОНИК М. Г.**

*Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Минский автомобильный завод»*

Технологический коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{техн}}$  печей заготовительного и механосборочного производств машиностроительных и автотракторных предприятий Республики Беларусь сегодня (за редким исключением) составляет 5–17 %. 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

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

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 теплоиспользования;  $Q_1$  – 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 механосборочного 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 машиностро-

тельных 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. В итоге внедрение трубчатого рекуператора в условиях машино- и автотракторостроения республики уже на стадии изготовления трубчатой поверхности теплообмена исключается полностью;

- 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/(м<sup>2</sup>·К). Механизм теплопередачи, лимитируемый теплоотдачей на горячей и холодной сторонах  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $k = \alpha_1\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2)$ ), теперь уже управляется термическим сопротивлением теплопроводности загрязняющего насоса окалины, полностью исключая определяющее влияние на теплообмен  $R_{\alpha_1}$  и  $R_{\alpha_2}$ .

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 нагре-

вательных 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 защемленными) 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 защемлен 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.

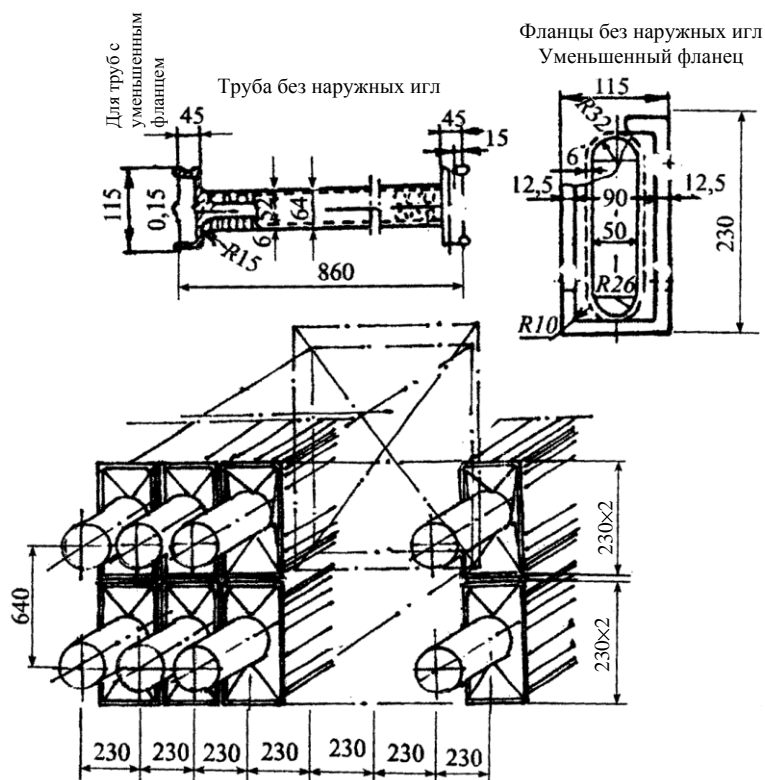


Рис. 1. Общий вид модульного унифицированного промышленного рекуператора (модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

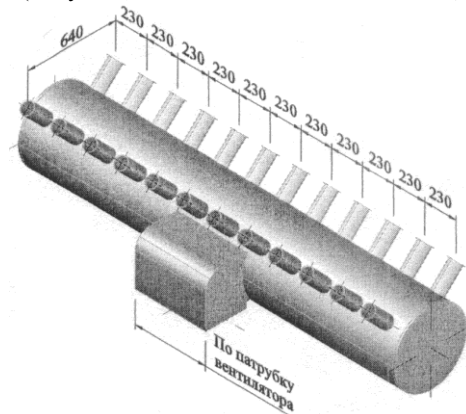


Рис. 2. Общий вид горячего (холодного) коллектора унифицированного промышленного рекуператора (модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

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, исключающей нарушение газоплотности в пределах как модуля (М-I и М-II), так и конструкции в собранном виде.

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. Оребре-

ние выполнено только на воздушной стороне элементов модулей М-I и М-II (трапецевидное 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).

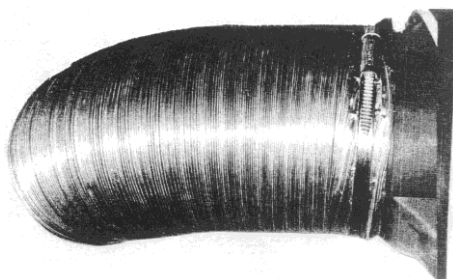


Рис. 3. Соединительный патрубок унифицированного промышленного рекуператора (модуль I, «Силал» М-I 115×460×860-05 и модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

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).

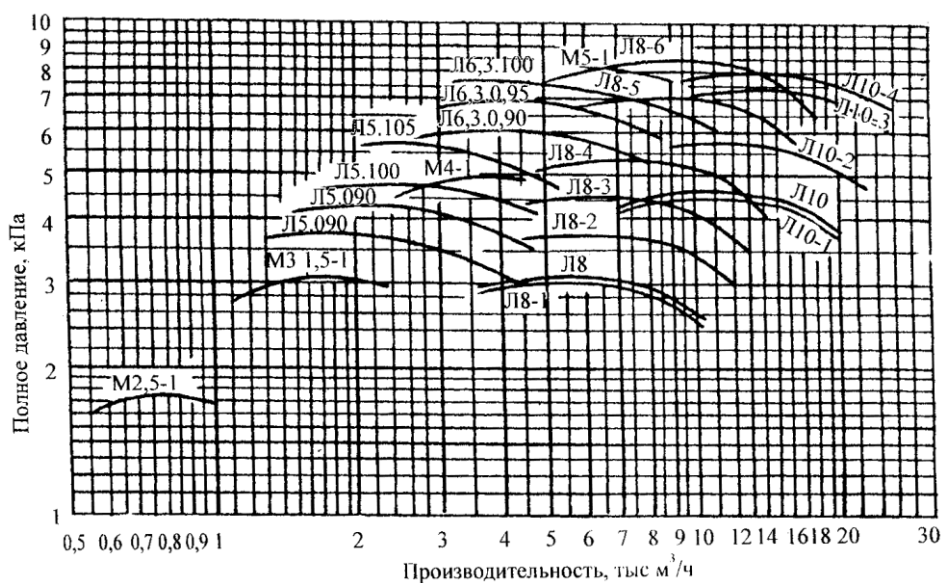


Рис. 4. Характеристика вентиляторов высокого давления (ВР-12-26 и В-Ц6-28) для модульного унифицированного промышленного рекуператора (модуль I, «Силал» М-I 115×460×860-05 и модуль II, «Силал» М-II 230×460×860-1,0)

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<br>$D_{ном}, \%$ | Частота вращения<br>$n_{дв}, \text{мин}^{-1}$ | Тип       | Мощность, кВт | Частота вращения<br>$n_{дв}, \text{мин}^{-1}$ |                                      |
| 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                                 |
| M3,16-1б                            |            |                                 | 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  | 4D200M2   | 37            | 2940  | 430                                  |
| Вентиляторы В-Ц6-28 (исполнение 1)  |            |                                 |   |           |               |   |                                      |
| L5.090-1a                           | 5          | 90                              | 2850  | АНР90L2   | 3             | 2850  | 103                                  |
| L5.090-1б                           |            |                                 | 2850  | АИР10082  | 4             | 2850  | 109                                  |
| L5.090-1в                           |            |                                 | 2850  | АИР100L2  | 5,5           | 2850  | 115                                  |
| L5.090-1г                           |            |                                 | 2895  | АИР112M2  | 7,5           | 2895  | 131                                  |
| L5.095-1a                           | 5          | 95                              | 2850  | АИР100S2  | 4             | 2850  | 109                                  |
| L5.095-1б                           |            |                                 | 2850  | АИР100L2  | 5,5           | 2850  | 115                                  |
| L5.095-1в                           |            |                                 | 2895  | АИР112M2  | 7,5           | 2895  | 131                                  |
| L5.100-1a                           | 5          | 100                             | 2850  | АИР100B2  | 5,5           | 2850  | 11                                   |
| L5.100-1б                           |            |                                 | 2895  | АИР112M2  | 7,5           | 2895  | 131                                  |
| L5.100-1в                           |            |                                 | 2910  | АИР132M2  | 11            | 2910  | 157                                  |
| L5.105-1a                           | 5          | 105                             | 2895  | АИР112M2  | 7,5           | 2895  | 131                                  |
| L5.105-1б                           |            |                                 | 2910  | АИР132M2  | 11            | 2910  | 157                                  |
| L6.3.090-1a                         | 6,3        | 90                              | 2910  | АИР132M2  | 11            | 2910  | 226                                  |
| L6.3.090-1б                         |            |                                 | 2910  | АНР160S2  | 15            | 2910  | 272                                  |
| L6.3.090-1в                         |            |                                 | 2910  | АИР160M2  | 18,5          | 2910  | 287                                  |
| L6.3.090-1г                         |            |                                 | 2925  | АНР180S2  | 22            | 2925  | 305                                  |
| L6.3.095-1a                         | 6,3        | 95                              | 2910  | АИР132M2  | 11            | 2910  | 226                                  |
| L6.3.095-1б                         |            |                                 | 2910  | АНР160S2  | 15            | 2910  | 272                                  |
| L6.3.095-1в                         |            |                                 | 2910  | АИР160M2  | 18,5          | 2910  | 287                                  |
| L6.3.095-1г                         |            |                                 | 2925  | АНР180S2  | 22            | 2925  | 305                                  |
| L6.3.100-1a                         | 6,3        | 100                             | 2910  | АНР160S2  | 15            | 2910  | 272                                  |
| L6.3.100-1б                         |            |                                 | 2910  | АИР160M2  | 18,5          | 2910  | 287                                  |
| L6.3.100-1в                         |            |                                 | 2925  | АИР18082  | 22            | 2925  | 305                                  |
| L6.3.100-1г                         |            |                                 | 2925  | АИР180M2  | 30            | 2925  | 325                                  |
| L8-a                                | 8          | –                               | 1460  | 4A132M4   | 11            | 1460  | 375                                  |
| L8-б                                |            |                                 | 1465  | 4A160S4   | 15            | 1465  | 417                                  |
| L10-a                               | 10         | –                               | 1470  | 4A180M4   | 30            | 1470  | 685                                  |
| L10-б                               |            |                                 | 1475  | 4A200M4   | 37            | 1475  | 760                                  |
| Вентиляторы В-Ц6-28 (исполнение 6)  |            |                                 |   |           |               |   |                                      |
| L8-1a                               | 8          | –                               | 1430  | 4A132M4   | 11            | 1460  | 635                                  |
| L8-1б                               |            |                                 | 1430  | 4A160S4   | 15            | 1465  | 677                                  |
| L8-2a                               |            |                                 | 1600  | 4A160S4   | 15            | 1465  | 685                                  |

|       |  |  |      |         |      |      |     |
|-------|--|--|------|---------|------|------|-----|
| Л8-26 |  |  | 1600 | 4A160M4 | 18,5 | 1465 | 720 |
| Л8-3а |  |  | 1750 | 4A160M4 | 18,5 | 1470 | 740 |
| Л8-3б |  |  | 1750 | 4A180S4 | 22   | 1470 | 760 |

Окончание табл. 1.

| Обозначение | Вентилятор |                              |   | Двигатель |               |   | Масса вентилятора (с двигателем), кг |
|-------------|------------|------------------------------|---|-----------|---------------|---|--------------------------------------|
|             | Номер      | Диаметр колеса $D_{ном}$ , % | Частота вращения $n_{дв}$ , мин <sup>-1</sup> | Тип       | Мощность, кВт | Частота вращения $n_{дв}$ , мин <sup>-1</sup> |                                      |
| Л8-4а       | 8          | -                            | 1900  | 4A180S4   | 22            | 1470  | 740                                  |
| Л8-4б       |            |                              | 1900  | 4A180M4   | 30            | 1470  | 760                                  |
| Л8-5а       |            |                              | 2200  | 4A200M4   | 37            | 1475  | 855                                  |
| Л8-5б       |            |                              | 2200  | 4A200L4   | 45            | 1475  | 895                                  |
| Л8-6а       |            |                              | 2400  | 4A200L4   | 45            | 1475  | 895                                  |
| Л8-6б       |            |                              | 2400  | 4A225M4   | 55            | 1480  | 940                                  |
| Л10-1а      | 10         | -                            | 1440  | 4A180M4   | 30            | 1470  | 915                                  |
| Л10-1б      |            |                              | 1440  | 4A200M4   | 37            | 1475  | 990                                  |
| Л10-2а      |            |                              | 1600  | 4A200M4   | 37            | 1475  | 1000                                 |
| Л10-2б      |            |                              | 1600  | 4A200L4   | 45            | 1475  | 1040                                 |
| Л10-2в      |            |                              | 1600  | 4A225M4   | 55            | 1475  | 1085                                 |
| Л10-3а      |            |                              | 1800  | 4A225M4   | 55            | 1475  | 1095                                 |
| Л10-3б      |            |                              | 1800  | 4A250S4   | 75            | 1480  | 1230                                 |
| Л10-4а      |            |                              | 1875  | 4A225M4   | 55            | 1475  | 1095                                 |
| Л10-4б      |            |                              | 1875  | 4A250S4   | 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.

#### ВЫВОД

Анализ указывает на необходимость существования на данном этапе заготовительных и механосборочных теплотехнологий машиностроительных и автотракторных предприятий, конструкции чугунного рекуператора, модифицированного кремнием.

При сохранении чугунной конструкции необходимость унификации элементов (модулей) промышленного рекуператора для всего парка печного хозяйства заводов очевидна. В этом плане предлагаются унифицированные единые модули («Силал» М-I 115×460×860-05 и «Силал» М-II 230×460×860-1,0).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет нагревательных и термических печей / С. Б. Василькова [и др.]; под ред. В. М. Тымчака, В. Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983.

2. С п р а в о ч н и к конструктора печей прокатного производства: в 2 т. / А. И. Бергауз [и др. ]; под ред. В. М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1970.

Представлена кафедрой промышленной  
теплоэнергетики и теплотехники

Поступила 10.01.2007