



*The influence of productivity of quenching aggregates on their heating working and specific fuel consumption is examined at the example of heating furnaces of convection type.*

И. А. ТРУСОВА, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 669.04

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОВУЮ РАБОТУ ЗАКАЛОЧНО-ОТПУСКНЫХ АГРЕГАТОВ

Одним из важнейших показателей при организации рациональной тепловой работы нагревательных и термических печей является удельный расход условного топлива.

Для исследования влияния производительности закалочно-отпускных агрегатов на их тепловую работу и удельный расход топлива проанализированы особенности конструкций закалочных и отпускных печей агрегатов термообработки, установленных в ЦКПП ОАО «БЕЛКАРД».

В ЦКПП функционируют четыре закалочно-отпускных агрегата, при этом два агрегата находятся на реконструкции, два в работе (один из них

реконструирован путем замены каркаса, футеровки и горелочных устройств).

Характеристика печей приведена в табл. 1, 2.

Для сравнения свойств футеровки в печах различных закалочно-отпускных агрегатов основные характеристики диатомитового кирпича и плит ШВП приведены в табл. 3, 4.

В качестве среднего слоя в реконструированном агрегате использована теплоизоляция Paroc UNS 37, представляющая собой эластичную, универсальную негорючую плиту из каменной ваты. Плотность теплоизоляции  $27 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность в сухом состоянии  $\lambda_A = 0,040 \text{ Вт/(м·К)}$ ;

Таблица 1. Характеристика нагревательной печи закалочно-отпускного агрегата до реконструкции

| Показатель   | Значение   |              |
|--|--|--------------|
|  | минимальное                                      | максимальное |
| Производительность печи, т/ч                                       | –  | 1,4          |
| Производительность печи фактическая, т/ч                           | 0,6  | 0,8          |
| Размеры внутреннего печного пространства $H \times B \times L$ , м | 0,8 × 1,29 × 6,3                                 |              |
| Габаритные размеры по наружному кожуху $H \times B \times L$ , м   | 2,85 × 2,336 × 7,798                             |              |
| Размеры окна загрузки и выгрузки, м                                | 0,35 × 1,3                                       |              |
| Расположение дымоотбора  | Над загрузочным окном (плоский зонт)             |              |
| Материал и толщины слоев футеровки стен и свода                    | Кирпич ША, диатомит, толщина стен и свода 464 мм |              |
| Масса конвейерной ленты, кг  | 2000   |              |

Таблица 2. Характеристика нагревательной печи закалочно-отпускного агрегата после реконструкции

| Показатель   | Значения  |              |
|--|---|--------------|
|  | минимальное   | максимальное |
| Производительность печи, т/ч                                       | –   | 1,4          |
| Производительность печи фактическая, т/ч                           | 0,9   | 1,2          |
| Размеры внутреннего печного пространства $H \times B \times L$ , м | 0,59 × 1,29 × 7,35  |              |
| Габаритные размеры по наружному кожуху $H \times B \times L$ , м   | 2,695 × 1,88 × 9,528  |              |
| Размеры окна загрузки и выгрузки, м                                | 0,25 × 1,3  |              |
| Материал и толщины слоев футеровки стен и свода                    | ШВП-350, 100 мм, плиты UNS-37, 50 мм, маты прошивные, 60 мм |              |
| Масса конвейерной ленты, кг  | 2000  |              |

Таблица 3. Основные теплофизические показатели диатомитового кирпича

| Наименование   | Марка кирпича |       |       |
|--|---------------|-------|-------|
|  | 350           | 400   | 500   |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                               | 350           | 400   | 500   |
| Теплопроводность, Вт/(м·К), не более, при температуре, °С: |               |       |       |
| 25   | 0,084         | 0,10  | 0,105 |
| 300  | 0,122         | 0,145 | 0,160 |

Таблица 4. Физико-химические и теплофизические показатели плит ШВП-350

| Наименование показателя для ШВП-350                        | Значение |
|--|----------|
| Химический состав, %, не менее                             |          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                             | 50,0     |
| SiO <sub>2</sub>   | 48,0     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                               | 350±50   |
| Температура применения, °С                                 | 1200     |
| Теплопроводность, Вт/(м·К), не более, при температуре, °С: |          |
| 500  | 0,25     |
| 800  | 0,28     |
| 1000   | 0,31     |
| 1200   | 0,36     |

$\lambda_B = 0,042$  Вт/(м·К);  $\lambda_D$  (декларируемая) = 0,037 Вт/(м·К).

В качестве наружного изоляционного слоя обследованных агрегатов используются прошивные маты (ГОСТ 21880–94) (табл. 5).

Таблица 5. Характеристика минераловатных матов

| Наименование продукции                                | Температура применения, °С | Толщина, мм | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К) при $t = 25$ °С |
|---|----------------------------|-------------|------------------------------|---|
| Маты минераловатные М1–100 без обкладочного материала | от –180 до + 700           | 60(80)      | Свыше 85 до 110              | 0,036   |

Конструкция футеровок закалочного-отпускных агрегатов представлена на рис. 1.

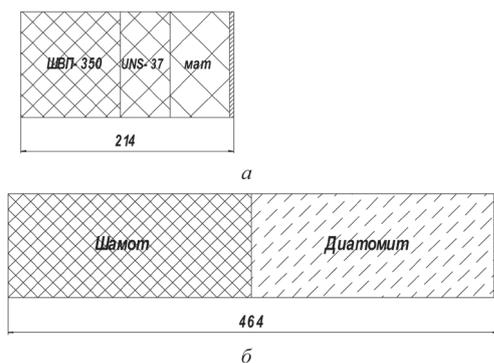


Рис. 1. Конструкция футеровок закалочного-отпускных агрегатов: а – с применением волокнистых материалов; б – с традиционной футеровкой

Для оценки тепловых потерь при работе печи найдем количество теплоты, затрачиваемой на разогрев футеровки печи.

Разогрев футеровки прекращается, когда наступает стационарный режим тепловой работы печи. На рис. 2 показано температурное поле волокнистой футеровки в процессе ее разогрева. Нагрев волокнистой футеровки прекращается по истечении 12 ч.

Объем внутреннего слоя волокнистой футеровки составляет 1,4 м<sup>3</sup>, наружных слоев – 1,7 м<sup>3</sup>. Средняя температура внутреннего слоя – 940 °С, а наружных слоев – 470 °С. Плотность внутреннего слоя равна 350 кг/м<sup>3</sup>, средняя теплоемкость – 1000 Дж/(кг·К), плотность наружных слоев –  $(27 \cdot 50 + 100 \cdot 60)/110 = 67$  кг/м<sup>3</sup>.

Потребляемая на разогрев теплота:

$$Q = mc\Delta t = 3501,4 \cdot 1000 \cdot (940 - 20) + 67 \cdot 1,7 \times 1000 \cdot (470 - 20) = 502,055 \text{ МДж.}$$

Средняя мощность за период разогрева:

$$Q_1 = Q/\tau = 502,055/(3600 \cdot 12) = 11,6 \text{ кВт.}$$

На рис. 3 показано температурное поле традиционной футеровки (шамотный и диатомитовые кирпичи) в процессе ее разогрева в течение 12 ч, а на рис. 4 – в течение 55 ч.

Объем внутреннего слоя традиционной футеровки (шамот) составляет 3,5 м<sup>3</sup>, наружного слоя (диатомит) – 4 м<sup>3</sup>. Средняя температура внутреннего слоя – 915 °С, а наружных слоев – 475 °С. Плотность внутреннего слоя равна 2300 кг/м<sup>3</sup>, средняя теплоемкость – 900 Дж/(кг·К), плотность наружного слоя – 500 кг/м<sup>3</sup>, средняя теплоемкость 850 Дж/(кг·К).

Тогда потребляемая на разогрев теплота:

$$Q = mc\Delta t = 23003,5 \cdot 900 \cdot (915 - 20) + 500 \cdot 4 \times 850 \cdot (475 - 20) = 7257,775 \text{ МДж.}$$

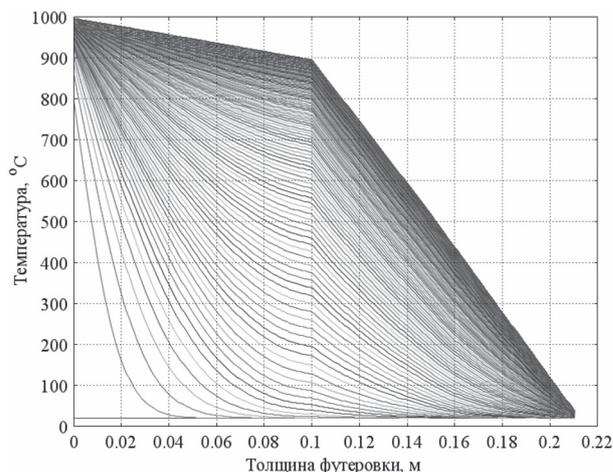


Рис. 2. Температурное поле волокнистой футеровки (линии соответствуют моментам времени с интервалом в 200 с)

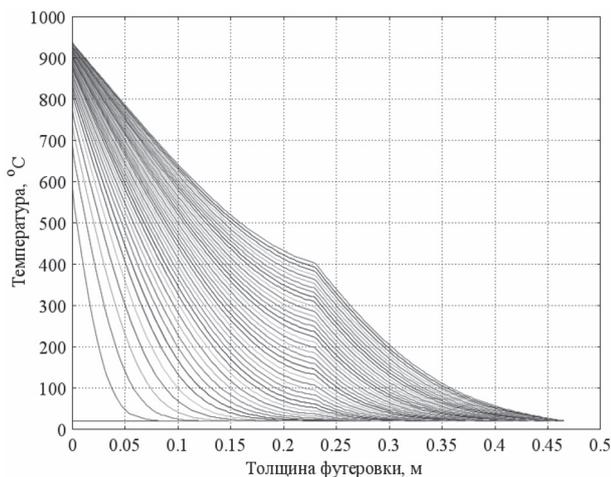


Рис. 3. Температурное поле традиционной футеровки (линии соответствуют моментам времени с интервалом в 1000 с)

Средняя мощность за период разогрева:

$$Q_1 = Q/\tau = 7257,775/(3600 \cdot 55) = 36,66 \text{ кВт.}$$

Очевидно, что средняя мощность за период разогрева для традиционной футеровки в 3 раза выше, чем при использовании волокнистой футеровки.

Помимо разогрева футеровки стен и свода печи энергия также теряется и на разогрев нижней камеры печи (под конвейерной лентой).

При эксплуатации закалочно-отпускных агрегатов предусмотрен трехсменный режим работы с отключением печей при длительных простоях. Согласно опытным данным, нагревательная печь на реконструированном агрегате остывает с 1000 до 400 °С за 6 ч. Поэтому при изменении производственной

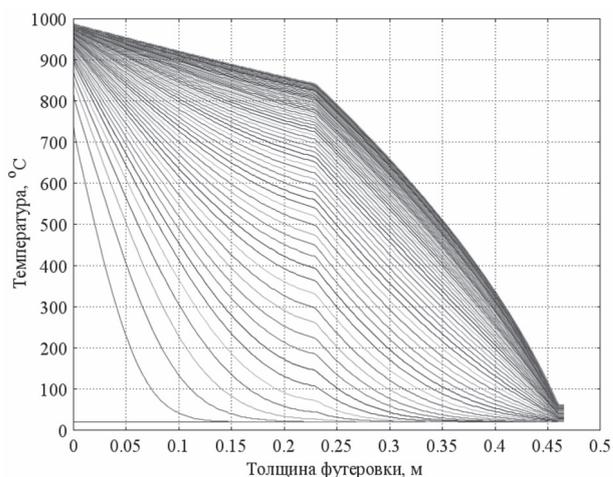


Рис. 4. Температурное поле традиционной футеровки (линии соответствуют моментам времени с интервалом в 3000 с)

программы и количества смен работы агрегатов необходимо учитывать их разогрев.

Для исследования влияния производительности на удельный расход топлива рассчитаны тепловые балансы при работе нагревательной печи после реконструкции и удельный расход топлива (природного газа) для случаев минимальной (0,9, 1,2 т/ч) и максимальной (1,4 т/ч) производительности агрегата. Результаты расчетов приведены в табл. 6–8.

Сравнительный анализ результатов расчета свидетельствует о том, что влияние производительности довольно существенное и составляет по расходу топлива относительно производительности, равной 1,2 т/ч (с данной производительностью агрегат работает самое продолжительное время):

Таблица 6. Тепловой баланс нагревательной печи ЗОА № 5 при текущем состоянии печи ( $t_b = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,2 \text{ т/ч}$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 546058,2   | 97,1 | Нагрев металла $Q_M$                       | 192030,9   | 34,2 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 11057,7    | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 64236,6    | 11,4 |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 5018,0     | 0,9  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 234142,0   | 41,7 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 41358,6    | 7,4  |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 30365,9    | 5,4  |
| Итого                                    | 562133,9   | 100  | Итого                                      | 562133,9   | 100  |

Расход природного газа составил  $V = 0,0156 \text{ м}^3/\text{с} = 56,2 \text{ м}^3/\text{ч} = 46,8 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Таблица 7. Тепловой баланс нагревательной печи ( $t_b = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 0,9 \text{ т/ч}$ ,  $K_{\text{зап}} = 1,5$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 439824,9   | 97,2 | Нагрев металла $Q_M$                       | 144023,2   | 31,8 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 8906,5     | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 48177,4    | 10,6 |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 3784,4     | 0,8  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 188590,6   | 41,7 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 41358,6    | 9,1  |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 30365,9    | 6,7  |
| Итого                                    | 452515,7   | 100  | Итого                                      | 452515,7   | 100  |

Расход природного газа составил  $V = 0,0126 \text{ м}^3/\text{с} = 45,2 \text{ м}^3/\text{ч} = 50,27 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Т а б л и ц а 8. Тепловой баланс нагревательной печи ( $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,4\text{ т/ч}$ ,  $K_{\text{зап}} = 0,5$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 616802,0   | 97,1 | Нагрев металла $Q_M$                       | 224036,0   | 35,3 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 12490,2    | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 74942,7    | 11,8 |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 5886,8     | 0,9  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 264475,9   | 41,6 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 41358,6    | 6,5  |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 30365,9    | 4,8  |
| Итого                                    | 635179,0   | 100  | Итого                                      | 635179,1   | 100  |

Расход природного газа составил  $V = 0,0176\text{ м}^3/\text{с} = 63,4\text{ м}^3/\text{ч} = 45,32\text{ м}^3/\text{т}$ .

для  $P = 0,9\text{ т/ч}$  превышение расхода  $\Pi = 50,27 - 46,8 = 3,47\text{ м}^3/\text{т}$  или  $\Pi_1 = 7,4\text{ \%}$ ;

для  $P = 1,4\text{ т/ч}$  экономия газа составит  $\Xi = 46,8 - 45,32 = 1,48\text{ м}^3/\text{т}$  или  $\Xi_1 = 3,2\text{ \%}$ .

При повышении производительности за счет увеличения скорости движения конвейерной ленты при постоянном коэффициенте заполнения ленты (для приведенного случая  $K_{\text{зап}} = 0,5$  означает, что площадь, занимаемая металлом на ленте, составляет 50 % всей площади ленты) несколько увеличивается теплота, теряемая при охлаждении конвейерной ленты при обратном ходе через нижнюю камеру печи.

В случае производительности 0,9 т/ч теплота, теряемая лентой, составляет 10,6% расходной статьи, а в случае производительности 1,4 т/ч – 11,8 %.

Повышение эффективности работы печей при увеличении производительности связана с тем, что в этом случае увеличивается доля теплоты, поглощенная металлом, так как теплота, теряемая через ограждающие конструкции, практически не изменяется.

Снижению потерь тепловой энергии на транспортные устройства и, в частности теряемых конвейерной лентой, может способствовать увели-

чение заполнения ленты деталями, а также расположение их в два или три слоя при условии небольших диаметров деталей и обеспечения равномерности прогрева.

В качестве основного варианта для расчетов принят коэффициент заполнения ленты деталями, равный  $K_{\text{зап}} = 0,5$ . Коэффициент заполнения ленты, равный единице, означает заполнение деталями всей площади ленты, а  $K_{\text{зап}} = 1,5$  – то, что 1/3 часть от всего количества деталей располагаются вторым слоем.

В табл. 9, 10 приведены результаты расчета тепловых балансов для производительности агрегата, равной  $P = 1,2\text{ т/ч}$ , при заполнении ленты для вариантов  $K_{\text{зап}} = 1,0$  и 1,5.

Из таблиц видно, что доля теплоты, затраченной на нагрев конвейерной ленты в случае увеличения коэффициента заполнения, будет уменьшаться:

для  $K_{\text{зап}} = 0,5$   $Q_{\text{лент}} = 11,4\text{ \%}$ ,  $Q_M = 34,2\text{ \%}$ ;

для  $K_{\text{зап}} = 1,0$   $Q_{\text{лент}} = 6,3\text{ \%}$ ,  $Q_M = 37,9\text{ \%}$ ;

для  $K_{\text{зап}} = 1,5$   $Q_{\text{лент}} = 4,4\text{ \%}$ ,  $Q_M = 39,3\text{ \%}$ .

Уменьшение доли теплоты, затраченной на нагрев конвейерной ленты, отражается на увеличении

Т а б л и ц а 9. Тепловой баланс нагревательной печи ( $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,2\text{ т/ч}$ ,  $K_{\text{зап}} = 1$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 491708,1   | 97,0 | Нагрев металла $Q_M$                       | 192030,9   | 37,9 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 9957,1     | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 32118,3    | 6,3  |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 5045,9     | 1,0  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 210837,4   | 41,6 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 41358,6    | 8,2  |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 30365,9    | 6,0  |
| Итого                                    | 506711,1   | 100  | Итого                                      | 506711,1   | 100  |

Расход природного газа составил  $V = 0,01405\text{ м}^3/\text{с} = 50,6\text{ м}^3/\text{ч} = 42,15\text{ м}^3/\text{т}$ .

Т а б л и ц а 10. Тепловой баланс нагревательной печи ( $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,2\text{ т/ч}$ ,  $K_{\text{зап}} = 1,5$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 473607,1   | 97,0 | Нагрев металла $Q_M$                       | 192030,9   | 39,3 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 9590,5     | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 21412,2    | 4,4  |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 5045,9     | 1,0  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 203076,0   | 41,6 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 41358,6    | 8,5  |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 30365,9    | 6,2  |
| Итого                                    | 506711,1   | 100  | Итого                                      | 506711,1   | 100  |

Расход природного газа составил  $V = 0,0135\text{ м}^3/\text{с} = 48,7\text{ м}^3/\text{ч} = 40,59\text{ м}^3/\text{т}$ .

Т а б л и ц а 11. Тепловой баланс отпускной печи ( $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,2\text{ т/ч}$ ,  $K_{\text{зап}} = 0,4$ )

| Статья                                   | Приход, Вт | %    | Статья                                     | Расход, Вт | %    |
|--|------------|------|--|------------|------|
| От сжигания топлива $Q_T$                | 360060,5   | 97,8 | Нагрев металла $Q_M$                       | 146847,1   | 39,9 |
| С подогретым воздухом $Q_B$              | 7291,2     | 2,0  | Нагрев конвейерной ленты $Q_{\text{лент}}$ | 38647,5    | 10,5 |
| Экзотермические реакции $Q_{\text{экз}}$ | 764,5      | 0,2  | С уходящими газами $Q_{\text{ух.г}}$       | 115348,0   | 31,3 |
|  |            |      | Потери теплопроводностью $Q_{\text{ст}}$   | 53364,3    | 14,5 |
|  |            |      | Потери излучением $Q_{\text{изл}}$         | 13909,3    | 3,8  |
| Итого                                    | 368116,3   |      | Итого                                      | 368116,3   |      |

Расход природного газа составил  $V = 0,01029\text{ м}^3/\text{с} = 37,0\text{ м}^3/\text{ч} = 30,86\text{ м}^3/\text{т}$ .

доли теплоты, поглощенной металлом, и соответственно на коэффициенте полезного действия печи:

для  $K_{\text{зап}} = 1,0$   $\Delta = (46,8 - 42,15) = 4,65\text{ м}^3/\text{т}$  или  $\Delta_1 = 9,9\%$ ;

для  $K_{\text{зап}} = 1,5$   $\Delta = (46,8 - 40,59) = 6,21\text{ м}^3/\text{т}$  или  $\Delta_1 = 13,3\%$ .

Для исследования влияния энерготехнологических параметров работы печи на ее эффективность были рассчитаны тепловые балансы отпускной печи, расположенной после закалочного бака закалочно-отпускного агрегата ЗОА № 5. Температурный режим отпускной печи отличается от нагревательной – температуры по зонам ниже и составляют  $500 - 700\text{ }^\circ\text{C}$ . Рекуператор данной печи также работает неэффективно, температуры подогрева в данном случае несколько выше, чем для нагревательной печи, но не превышают  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . В дальнейших расчетах тепловых балансов также принята производительность  $P = 1,2\text{ т/ч}$  и  $K_{\text{зап}} = 0,4$ . В табл. 11 приведены результаты расчета тепловых балансов отпускной печи при температуре воздуха, подаваемого на горение, равной  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .

В результате обследования закалочно-отпускных агрегатов было выявлено, что реконструированному агрегату также присущи определенные недостатки. Например, дымоотбор установлен

в нижней части печи, а дымоудаление из рабочего пространства осуществляется через зазоры между футеровкой и конвейерной лентой. При этом температура подогрева воздуха в рекуператоре незначительна и составляет около  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Причиной этого являются несколько обстоятельств: высокая мощность дымососа (при этом в дымовые газы подсасывается значительное количество воздуха из нижней камеры печи) и свободный проход воздуха в нижнюю камеру вследствие негерметичности камеры.

Несмотря на неэффективную работу установленного рекуператора, реконструкция нагревательной и отпускной печи ЗОА имела и положительные моменты, отразившиеся в повышении эффективности их работы. В частности, была реконструирована футеровка печи, вследствие чего уменьшились тепловые потери через стены печи.

Вместе с тем, имеются резервы экономии топлива за счет подогрева воздуха, подаваемого на горение.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что обеспечение рациональных графиков и режимов работы закалочно-отпускных агрегатов способствует экономии топливно-энергетических ресурсов в объеме до  $10-15\%$ .