

## РАСЧЕТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОХОДНОГО АГРЕГАТА ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ IPSEN

**П.Э. РАТНИКОВ**, канд. техн. наук, **И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук,  
**Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
Белорусский национальный технический университет

*Рассмотрен вариант снижения энергопотребления проходного агрегата химико-термической обработки стальных деталей типа IPSEN. Предложена модернизация действующего агрегата путем замены существующей футеровки с использованием современных футеровочных материалов. Показано, что потребление электроэнергии может быть снижено практически в два раза и рассчитан предполагаемый эффект от реализации мероприятия.*

**Ключевые слова:** энергопотребление, проходной агрегат химико-термической обработки, модернизация, футеровка

## ASSESSMENT OF THE ECONOMIC PERFORMANCE OF USING DIFFERENT TYPES OF ENERGY RESOURCES IN CHAMBER FURNACES OF CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT

**P.E. RATNIKOV**, Ph.D in Technical Science, **I.A. TRUSOVA**,  
Dr. of Engineering Sciences, **N.G. MALKEVICH**, Ph.D in Technical Science,  
Belarusian National Technical University

*A variant of reducing the energy consumption of a through-feed unit for chemical-thermal treatment of steel parts of the IPSEN type is considered. The modernization of the operating unit by replacing the existing lining with the use of modern lining materials is proposed. It is shown that electricity consumption can be reduced by almost half, and the estimated effect of the implementation of the measure is calculated.*

**Keywords:** energy consumption, through-through unit for chemical-thermal treatment, modernization, lining

Агрегат для химико–термической обработки IPSEN размещен на площадях термического цеха термогальванического завода «ОАО МАЗ – управляющая компания холдинга БЕЛАВТОМАЗ». Проходной агрегат предназначен для проведения цементации деталей (шестерен ведомых и ведущих) с возможностью закалки в штампах (прессах) и в свободном состоянии (в закалочной ванне) с последующей мойкой и низким отпуском. Для осуществления технологического процесса в полном объеме необходим ряд основных и вспомогательных устройств. Назначение данных устройств указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Назначение устройств агрегата IPSEN

№ поз.	Устройство	Назначение устройства
1	2	3
1	Проходная печь предварительного нагрева	Для нагрева деталей до температуры 450–500 °С
2	Проходная печь газовой цементации (электрическая печь сопротивления)	Включает: - впускной шлюз; - зону нагрева (нагрев в защитной атмосфере с 450–500 °С до температуры насыщения 900–930 °С); - зону науглероживания (насыщение поверхности деталей углеродом с температур 900–930 °С); - зону промежуточного охлаждения (охлаждение и выдержка деталей перед закалкой); - зону закалки (нагрев деталей в защитной атмосфере до 840–860 °С); - трансферную зону (зона забора деталей для закалки в закалочном баке либо в закалочном прессе)
3	Ванна закалки	Для термической закалки деталей в свободном состоянии (на масло)
4	Однопозиционный закалочный пресс	Для термической закалки деталей в прессе (на масло)

Окончание таблицы 1

1	2	3
5	Двухкамерная моечная машина	Для мойки деталей после закалки
6	Проходная отпускная печь (электрическая печь сопротивления)	Для термического отпуска деталей с температур 170–200 °С
7	Манипулятор печи	Для забора деталей из трансферной зоны
8	Пневматический манипулятор	Для забора деталей с манипулятора печи в закалочный пресс
9	Устройства управления и регулировки процесса (электрошкафы, ПК)	Для регулировки процесса насыщения на всех этапах
10	Эндогенератор газовый	Для приготовления защитной и насыщающей атмосферы
11	Комплект приспособлений	Для закалки деталей в закалочном прессе (штампы)
12	Оснастка для садки	Для осуществления загрузки и перемещения в агрегате обрабатываемых деталей
13	Переносной прибор-анализатор CO <sub>2</sub>	Для контроля атмосферы печи
14	Защитное оборудование	Для защиты персонала при проведении технического обслуживания агрегата
15	Переносной прибор ИМРАСТ-D	Для измерения твердости поверхности обработанных деталей
15.1	Программное обеспечение	Для приема данных с прибора с целью применения в системе Windows
16	Полуавтоматический твердомер Vickers	Для измерения глубины цементованного слоя

Схема размещения основных узлов агрегата IPSEN представлена на рисунке 1.

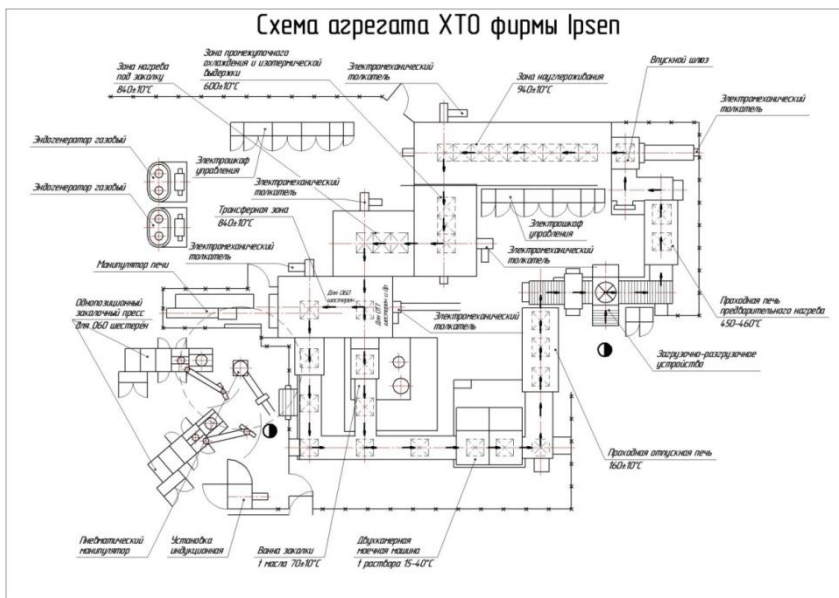


Рисунок 1 – Схема размещения основных узлов агрегата IPSEN

Детали загружаются на приспособления и при помощи загрузочно-разгрузочного устройства перемещаются в агрегат. В агрегате шестерни подвергаются химико-термической обработке согласно заданной программе. Детали на приспособлениях помещаются в печь предварительного нагрева, где происходит нагрев до 450–500 °С встроенными в свод печи электронагревателями. Корпус печи выполнен из листовой профильной стали, обшивка – из теплоизоляционных материалов. Входная и выходная двери изготовлены из профильной стали с теплоизоляцией, имеют электромеханический привод и управление от концевых выключателей. В печи встроен вентилятор для циркуляции.

Цепным толкателем садка перемещается в проходную печь газовой цементации, состоящую из впускного шлюза; зоны нагрева (нагрев в защитной атмосфере с 450–500 °С до температуры насыщения 900–930 °С); зоны науглероживания (насыщение поверхности деталей углеродом с температурой 900–930 °С); зоны промежу-

точного охлаждения (охлаждение и выдержка деталей перед закалкой); зоны закалки (нагрев деталей в защитной атмосфере до 840–860 °С); трансферной зоны (зона забора деталей для закалки в закалочном баке либо в закалочном прессе).

Впускной шлюз представляет собой газонепроницаемую сварную конструкцию с теплоизоляцией, со всеми необходимыми отверстиями и приспособлениями для подсоединения к входной двери люка техобслуживания, предохранительным клапаном, отводом попутных газов, факельной завесой, поперечного устройства толкателя, а также смотрового отверстия. Впускной шлюз оснащен шлюзовой тележкой и устройством толкания для транспортировки садки.

Зона нагрева, науглероживания, промежуточного охлаждения, закалки, трансфера и забора расположены в общем газонепроницаемом корпусе из листовой профильной стали. Футеровка выполнена из огнеупорного кирпича.

Печь цементации оснащена системой транспортировки садки через все зоны печи (направляющие, толкатели и т.д.); промежуточными дверями для разделения зон печи, заборной дверью (между печью и трансферной зоной); дверьми для выгрузки; вентиляторами для перемешивания атмосферы в зоне цементации и вентиляторами охлаждения в зоне закалки; электронагревателями; устройствами насыщения газом; кислородными зондами для контроля атмосферы печи; термомпарами для регулировки температуры печи и т.д.

Из трансферной зоны (зоны забора) детали поступают на закалку в штампах (закалочных прессах) либо на закалку в свободном состоянии (в закалочной ванне).

Закалочная ванна предназначена для закалки деталей на масло в свободном состоянии и представляет собой бак с двойными стенками из профильной листовой стали. Оснащена устройством охлаждения масла (теплообменник, насос и т.д.); устройством подъема и опускания; электронагревателями для нагрева масла; устройствами контроля температуры и уровня масла; насосами для циркуляции масла и т.д.

Однопозиционный пресс модель HEESS CP-500 для закалки деталей в штампах предназначен для закалки в штампах (штампы сменные в зависимости от высоты и диаметра) деталей с максимальным внешним диаметром 500 мм и максимальной высотой 80

200 мм. Пресс оснащен передвижным столом и устройствами для автоматического вхождения и отвода стола в закалочный пресс, снятия деталей с нижней части прессы; для смены штампов имеется подъемный механизм (грузоподъемностью 500 кг); устройствами охлаждения и регулировки объема закалочного масла; устройствами установления времени подачи масла; устройствами регулировки усилий; устройствами вытяжки масла и пыли; пультом управления (отдельный электрошкаф с ПК) и т.д.

После закалки детали подвергаются мойке в двухкамерной моечной машине. Корпус состоит из баков мойки струями, выполнен из специальной высококачественной стали, с теплоизоляцией. Состоит из двух зон: 1-я зона предназначена для мойки струями, 2-я зона – для ополаскивания и продувки (сушки). Моечная машина оснащена тремя дверьми в герметичном исполнении; оросительным контуром, с форсунками; насосом с приводным двигателем; конденсатором испарений; системой циркуляции воздуха; нагревательным устройством; маслоотделителями и т.д.

Проходная отпускная печь предназначена для отпуска деталей при температуре 160–250 °С. Корпус печи выполнен из листов профильной стали с двойными стенками. Печь оснащена нагревательным устройством (электронагреватели); вентилятором; направляющим устройством; устройством поперечного толкателя и цепным транспортером; устройством для отвода газа и масляных паров; устройством контроля температуры в печи (термоэлементы) и т.д.

Манипулятор печи предназначен для выгрузки деталей из трансферной зоны, которые подвергаются закалке в штампах. Манипулятор снимает одну из паллет с двумя (одной) деталями из 5-ти расположенных одна за другой позиций оснастки для садов проходной печи.

Пневматический манипулятор подвижно установлен на вертикальной колонне, предназначен для забора конических шестерен с манипулятора печи и перемещения их на передвижной стол закалочного прессы.

Устройство коммуникации, управления и регулировки процесса представляет собой единое распределительное устройство для всей линии ХТО в целом. Система управления включает в себя: электрошкаф; встроенные компоненты; шкаф управления со встроен-

ным графическим прибором управления; персональный компьютер; программное обеспечение; устройства регулирования температуры (для печи предварительного нагрева, печи высокотемпературного нагрева, закалочной ванны, мойки, низкотемпературной печи отпуски); устройства регулировки углеродного потенциала в проходной печи газовой цементации; систему Conti-Control для регистрации измерительных значений, и т.д.

Эндогенератор IPSEN Тип G-3000-G предназначен для производства эндотермической защитной атмосферы. Стойка с электронной регулирующей аппаратурой и корпус собраны на общей базе. Корпус имеет термоизолирующую футеровку. Генератор состоит из двух вертикально расположенных реторт. На выходе из каждой реторты установлен двухступенчатый охладитель газа. Реторты заполнены катализаторной массой (керамическая масса, частично обогащенная никелем для повышения химической активности). Обогрев генератора газовый, нижняя часть реторт нагревается атмосферной кольцевой горелкой. Реторты оснащены двухкаскадной системой охлаждения, оба каскада имеют водяное охлаждение.

Газ и воздух подаются через расходомер с помощью герметизированного компрессора, смешивание происходит в смесительном резервуаре по принципу инжектора. На пути газового потока установлена следующая арматура: регулятор давления газа, электромагнитный клапан, реле давления и запорный вентиль. Газовая система размещена в нижней части вентилируемой стойки с распределительной арматурой.

Технологический режим химико-термической обработки деталей на агрегате IPSEN приведен на рисунках 2 и 3.

Если рассмотреть технологическую схему работы непрерывного агрегата химико-термической обработки IPSEN (рисунок 3), то очевидно, что наибольшие потери теплоты присутствуют в печи цементации. Это объясняется как продолжительностью процесса цементации, так и температурным уровнем. В связи с этим произведем расчет эффективности модернизации кладки цементационной печи путем установки современных футеровочных материалов.

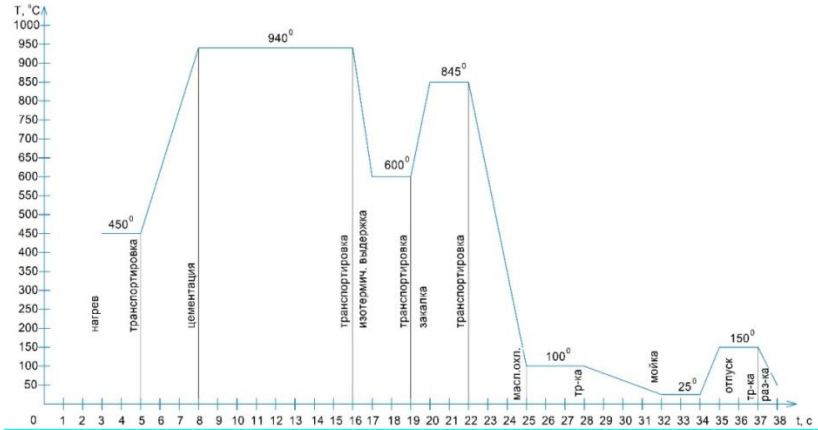


Рисунок 2 – График цементации на агрегате IPSEN

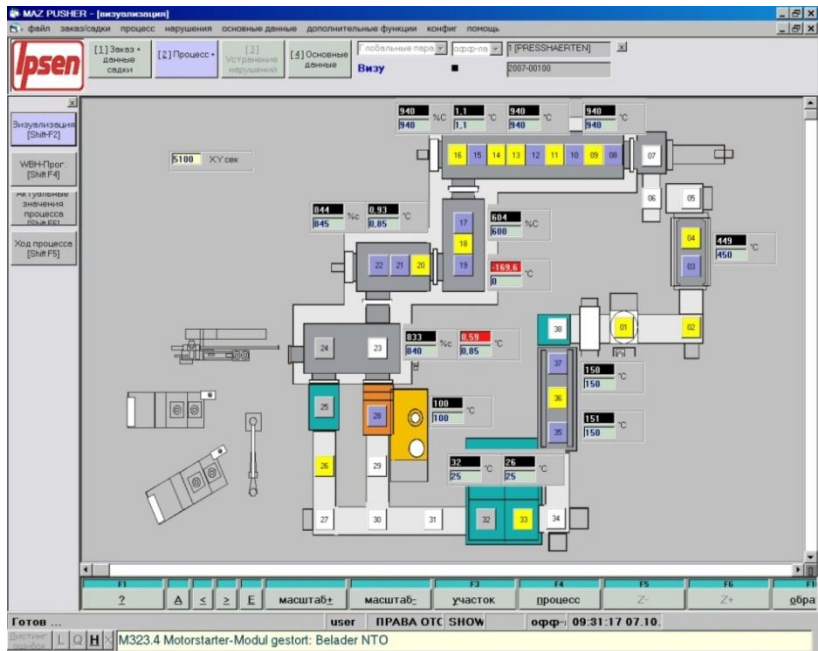


Рисунок 3 – Производственный цикл процесса цементации шестерен на агрегате IPSEN



Приведем расчет теплового баланса цементационной печи проходного агрегата ХТО IPSEN (существующий вариант).

*Расходные статьи баланса*

Расход теплоты на нагрев деталей

$$Q_{\text{заг}} = (c_{\text{м.к}} t_{\text{м.к}} - c_{\text{м.н}} t_{\text{м.н}}) M_{\text{заг}};$$

$$Q_{\text{заг}} = (0,550 \cdot 940 - 0,472 \cdot 450) \cdot 1115,1 = 339659,46 \text{ кДж.}$$

Расход теплоты на нагрев тары

$$Q_{\text{тар}} = (c_{\text{т.к}} t_{\text{т.к}} - c_{\text{т.н}} t_{\text{т.н}}) M_{\text{тар}};$$

$$Q_{\text{тар}} = (0,542 \cdot 940 - 0,472 \cdot 450) \cdot 1683 = 499985,64 \text{ кДж.}$$

Потери теплоты теплопроводностью через стенки

$$Q_{\text{тепл}} = \Sigma q F \tau,$$

где  $q$  – плотность теплового потока.

Для боковых стенок

$$q = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{в}}}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}};$$

$$q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,85} + \frac{1}{15}} = 1752,38 \text{ Вт/м}^2.$$

Для свода

$$q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,85} + \frac{1}{1,3}} = 749,18 \text{ Вт/м}^2.$$

Для пода

$$q = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{в}}}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}; q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,9}} = 2139,53 \text{ Вт/м}^2.$$

Итого потери теплоты теплопроводностью

$$Q_{\text{тепл}} = ((1752,38 \cdot 68,68) + (2139,52 \cdot 27,17) + (749,18 \cdot 27,17)) \cdot 32400 = 6442406,57 \text{ кДж.}$$

Потери с охлаждающей водой

$$Q_{\text{охл.вод}} = G \rho c_{\text{вод}} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) \tau,$$

$$Q_{\text{охл.вод}} = 0,000055 \cdot 1000 \cdot 4,2 \cdot (40 - 20) \cdot 32400 = 1496880 \text{ кДж.}$$

Потери на нагрев эндогаза

$$Q_{\text{энд}} = G c_{\text{энд}} (t_{\text{печ.кон}} - t_{\text{энд.кон}}) \tau,$$

где  $G$  – расход эндогаза,  $4,8 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,0011 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Теплоемкость эндогаза

$$c_{\text{энд}} = \sum \frac{\Delta l_i}{100} c_{i_{\text{эл}}};$$

$$c_{\text{энд}} = \left( \frac{21\text{CO}}{100} \cdot 1405 \right) + \left( \frac{39\text{H}_2}{100} \cdot 1453,3 \right) + \left( \frac{40\text{N}_2}{100} \cdot 1389,9 \right) = 1417,79 \text{ Дж.}$$

Тогда

$$Q_{\text{энд}} = 0,0011 \cdot 1417,79 \cdot (940 - 870) \cdot 32400 = 3537,1 \text{ кДж.}$$

Потери с тепловыми короткими замыканиями

$$Q_{\text{к.т.з}} = 0,2 \cdot Q_{\text{тепл}},$$

где  $Q_{\text{тепл}}$  – сумма потерь через стенки, кДж,

$$Q_{\text{к.т.з}} = 0,2 \cdot 6442406,57 = 1288481,314 \text{ кДж.}$$

*Приходные статьи баланса*

Теплота, вносимая эндогазом

$$Q_{\text{энд}} = G_{\text{энд}} c_{\text{энд}} t_{\text{энд}} \tau.$$

Теплоемкость эндогаза

$$c_{\text{энд}} = \left( \frac{21\text{CO}}{100} \cdot 1335,8 \right) + \left( \frac{39\text{H}_2}{100} \cdot 1432,3 \right) + \left( \frac{40\text{N}_2}{100} \cdot 1326,3 \right) = 1369,63 \text{ Дж.}$$

Тогда

$$Q_{\text{энд}} = 0,0011 \cdot 1369,63 \cdot 870 \cdot 32400 = 42467,8 \text{ кДж.}$$

Теплота, вносимая электроэнергией

$$Q_{\text{эл.эн}} = \Sigma Q_{\text{расх}} - Q_{\text{энд}} = 10070949,984 - 42467,9 = 10028482,184 \text{ кДж.}$$

Тепловой баланс печи цементации приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Тепловой баланс печи цементации агрегата IPSEN

Приходные статьи			Расходные статьи		
Статья	кДж	%	Статья	кДж	%
Теплота, вносимая электроэнергией	10028482,184	99,6	Нагрев деталей	339659,46	3,37
Теплота эндогаза	42467	0,4	Нагрев тары	499985,64	4,96
			Потери через стенки	6442406,57	63,97
			Потери с охлаждающей водой	1496880	14,86
			Потери на нагрев эндогаза	3537,1	0,03
			Потери с короткими замыканиями	1288481,314	12,79
Всего	10070949,984	100	Всего	10070949,9	100

Расчет теплового баланса цементационной печи показал, что максимальные тепловые потери происходят теплопроводностью

через кладку печи (около 60 %). Согласно описанию печи она футеруется огнеупорным шамотным кирпичом, поэтому актуально произвести замену на более современные футеровочные материалы.

Согласно данным источников [1–3] потери в камерных электрических печах составляют 14–65 %, что является существенной статьёй расходов относительно остальных показателей. Покрытие этих потерь требует значительного расхода энергии. Увеличение слоя футеровки из эксплуатируемого материала снизит потери в окружающую среду, однако это приведет к неизбежному увеличению капитальных затрат в связи с возрастанием тепловых потерь на аккумуляцию, а также повысятся эксплуатационные расходы на тепловое ограждение печи.

В мировом печестроении активно используют материалы нового поколения – волокнистые огнеупорные материалы. Их малая инерционность и низкий уровень теплопроводности дают возможность использовать их для футеровки практически любого термического оборудования вместо других более традиционных вариантов. Наибольшей эффективности удастся достигнуть, используя волокнистые огнеупорные материалы в термических печах с периодическим режимом действия или так называемым «рваным режимом», когда оборудование работает не в полную загрузку или в «квазистационарных» печах – печах непрерывного действия работающих в 1 или 2 смены. Так как волокнистые материалы имеют низкую плотность и низкую теплопроводность, то их использование дает возможность сократить в несколько раз массу футеровки в печах, а за счет этого уменьшить их габариты. Все это вместе позволяет уменьшить время, которое требуется на разогрев печи, сэкономить энергоресурсы, сократить время простоя персонала и непроизводительной работы печей. Экономия энергоносителей в данном случае может достигать 40 % для печей периодического действия и 25 % – для печей непрерывного действия. При этом оборудование выходит на заданный режим работы быстрее на 1,5–2 ч. Для того, чтобы окупить использование инновационных материалов для футеровки в печах непрерывного действия, требуется год-полтора, в печах периодического действия – не более полугода [2].

Еще одним важным преимуществом использования волокнистых материалов с огнеупорными свойствами является возможность

уменьшить трудоемкость работ по футеровке печей. Это достигается за счет удобства и простоты монтажа. Кроме того, такой вид футеровки при необходимости можно легко отремонтировать. Данный вид материалов малочувствителен к колебаниям температур, выдерживает большое количество циклов нагрев–охлаждение, не изменяя качественных характеристик, кроме того он легко поддается обработке. Футеровку из волокнистых огнеупорных материалов часто делают многослойной. При этом первый внутренний слой должен выдерживать самую большую температуру эксплуатации. Его, как правило, делают из муллито-кремнеземистого волокна на высокотемпературном связующем неорганического происхождения. Каждый следующий слой имеет меньшую температуру, соответственно и цены на такие материалы уже заметно дешевле. Это дает возможность получить наилучшее сочетание цены и качества материала [2].

Выполненные в работе [3] расчеты показали, что частичная модернизация термических печей машиностроительного производства путем замены шамотной на волокнистую футеровку экономически целесообразна и имеет достаточно малые сроки окупаемости.

В качестве реконструкции оценим замену шамотного кирпича на перлитокерамическую футеровку и силикатного кирпича – на керамоперлитофосфатную. Расчет теплового баланса аналогичен приведенному выше, при этом в расходной части подлежат пересчету такие статьи как потери теплоты теплопроводностью через стенки и потери с тепловыми короткими замыканиями.

Потери теплоты через стенки:

– для боковых стенок и свода

$$q = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{в}}}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}},$$

где  $\alpha$  для боковых стенок принимается равным 15 Вт/(м<sup>2</sup>·град), для свода – 1,3 Вт/(м<sup>2</sup>·град).

Тогда

– для боковых стенок

$$q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,3} + \frac{1}{15}} = 676,47 \text{ Вт/м}^2;$$

– для свода

$$q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,3} + \frac{1}{1,3}} = 444,66 \text{ Вт/м}^2;$$

– для пода

$$q = \frac{940 - 20}{\sum \frac{0,39}{0,36}} = 849,49 \text{ Вт/м}^2.$$

Суммарные потери теплоты теплопроводностью

$$\begin{aligned} Q_{\text{тепл}} &= ((676,47 \cdot 68,68) + (848,49 \cdot 27,17) + (444,66 \cdot 27,17)) \cdot 32400 = \\ &= 2644553,29 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Потери с тепловыми короткими замыканиями

$$Q_{\text{к.т.з}} = 0,2 \cdot Q_{\text{тепл}};$$

$$Q_{\text{к.т.з}} = 0,2 \cdot 2644553,28 = 52891,056 \text{ кДж.}$$

Теплота, вносимая электроэнергией

$$Q_{\text{эл.эн}} = \sum Q_{\text{расх}} - Q_{\text{энд}} = 5037506,39 - 42467 = 4995039,39 \text{ кДж.}$$

Тепловой баланс печи цементации агрегата IPSEN после замены футеровки приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Тепловой баланс печи цементации IPSEN после замены футеровки

Приходные статьи			Расходные статьи		
Статья	кДж	%	Статья	кДж	%
Теплота, вносимая электро-энергией	4995039,39	99,17	Нагрев заготовок	339659,46	6,74
Теплота эндогаза	42467	0,83	Нагрев тары	499985,64	9,9
			Потери через стенки	2644553,29	52,49
			Потери с охлаждающей водой	1496880	29,71
			Потери на нагрев эндогаза	3537,1	0,07
			Потери с короткими замыканиями	52891,056	1,04
Всего	5037506,39	100	Всего	5037506,39	100

Сравнение результатов расчета тепловых балансов печи до и после реконструкции показывает, что энергопотребление снизится примерно вдвое. Учитывая тариф (стоимость 1 кВт·ч), установленный с 01.01.2020 г. [4] при фонде рабочего времени 7200 ч в год (800 циклов термообработки) экономия за счет модернизации футеровки составит 1118543,02 кВт·ч или 214156,25 руб. Следует отметить, что модернизация других печей данного проходного агрегата ХТО даст меньший экономический эффект и имеет смысл дополнительно модернизировать еще только печь заковки.

**Заключение.** Проект замены футеровки печи, а именно огнеупорного шамотного и силикатного кирпича на современные волокнистые материалы с целью повышения эффективности агрегата, является экономически целесообразным. Оптимизация достигается за счет снижения тепловых потерь через кладку, а, следовательно, уменьшения затрат на электроэнергию.

## Список литературы

1. **Анализ** энергоэффективности и сроков окупаемости модернизированных печей сопротивления периодического типа действия / С.М. Кабишов [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36. – С. 88–100.

2 **Повышение** энергоэффективности печей сопротивления путем их модернизации с заменой футеровки / С.М. Кабишов [и др.] // *Энергоэффективность.* – 2015. – № 9 (215). – С. 28–31.

3. **Оценка** экономической эффективности применения волокнистой футеровки в термических газопламенных печах и печах сопротивления машиностроительного производства / В.И Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2011 – № 2(60). – С.160–162.

4. **Интернет-портал** РУП «Минскэнерго» [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.energosbyt.by>. Дата доступа 13.05.20.

## References

1. *Analiz energoeffektivnosti i srokov okupaemosti modernizirovannyh pechej soprotivleniya periodicheskogo tipa dejstviya* [Analysis of energy efficiency and payback periods of modernized batch resistance furnaces] / S.M. Kabishov [at al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdvdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2015 – Vyp. 36. – P. 88–100.

2. *Povyshenie energoeffektivnosti pechej soprotivleniya putem ih modernizacii s zamenoj futerovki* [Improving energy efficiency of resistance furnaces by upgrading them with replacement of the lining] / S.M. Kabishov [at al.] // *Energoeffektivnost' = Energy efficiency.* – 2015. – No. 9 (215). – P. 28–31.

3. *Ocenka ekonomicheskoj effektivnosti primeneniya voloknistoj futerovki v termicheskikh gazoplamennyh pechah i pechah soprotivleniya mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Evaluation of the economic efficiency of the use of fibrous lining in thermal gas-flame furnaces and resistance furnaces in engineering production] / V.I Timoshpol'skij [at al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2011. – No. 2(60). – P. 160–162.

4. <http://www.energosbyt.by>.

Поступила 24.07.2020

Received 24.07.2020