

А. П. НЕСЕНЧУК, д-р техн. наук,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
М. Л. ГЕРМАН, канд. физ.-мат. наук (РУП «БелТЭИ»),
А. П. РАКОМСИН, канд. техн. наук,
Т. В. РЫЖОВА, канд. техн. наук (РУП «МАЗ»),
Д. В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ),

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕРНИЗАЦИИ ПЕЧНОГО ХОЗЯЙСТВА ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО И МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВ

Ставя целью получение промышленного продукта заданного потребительского качества при достаточно низких затратах энергетических ресурсов, можно сформулировать основные направления создания парка печного хозяйства высокотемпературных промышленных теплотехнологий. Учитывая, что основа нагрева и термообработки – это качество заготовок перед горячим формообразованием и продукции термической обработки, а качество в свою очередь – продукт соблюдения технологии нагрева (технологической дисциплины), что зафиксировано температурным (режимным) графиком, все мероприятия по модернизации парка печей следует начинать с решения вопросов, касающихся температурного графика нагрева (термообработки). При этом нужно:

- установить, имеется ли температурный график конкретного теплового процесса конкретного изделия (заготовки) определенной марки стали и конкретной формы;
- выяснить, как может соблюдаться температурный график, если печь не оснащена приборами контроля (расходы топлива и воздуха-окислителя, теплота сгорания топлива, приборы измерения давления и температуры по зонам печи).

Если эти вопросы не решены на первом этапе работ, то приступить к реализации рекуперативного (в отдельных случаях и утилизационного) теплоиспользования, применения современных высокоэффективных огнеупорных и теплоизоляционных материалов, совершенных схем ручного и автоматического регулирования нецелесообразно, так как это не даст должного положительного эффекта.

Известно, что от регенеративного теплоиспользования затраты топлива на нагрев и термообработку могут быть снижены на величину от 9 до 15 %

$$B_{\text{факт}} = B - \Delta B,$$

где

$$\Delta B = B \mathcal{E}_{\text{под}} \mathcal{E} \%.$$

Здесь $\mathcal{E}_{\text{под}}$ – топливный эквивалент подогрева; $\mathcal{E}_{\text{под}} = 1/\eta_{\text{н.т}}$; $\mathcal{E} \%$ – сокращение подачи топлива в рабочее пространство печи при подогреве окислителя топлива.

В итоге фактический технологический КПД печи запишется следующим образом:

$$\eta_{\text{техн}}^{\text{ф}} = \frac{Q_1}{(B - \Delta B) Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot 100 \%.$$

Причем: $\eta_{\text{техн}} < \eta_{\text{техн}}^{\text{ф}}$; $\eta_{\text{техн}} = \frac{Q_1}{B Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$

Эффект для цеха (завода) еще увеличится (он оценивается энергетическим КПД), если реализовать внешнее (утилизационное) теплоиспользование

$$\eta_{\text{энерг}}^{\text{ф}} = \frac{Q_1 + Q_{\text{доп}}}{(B - \Delta B) Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot 100 \%,$$

где $Q_{\text{доп}}$ – энергетическая составляющая дополнительного технологического продукта, полученного в результате внедрения утилизационного теплоиспользования.

Кроме реализации внутреннего теплоиспользования с эффектом $\Delta B = 10 \%$, внедрение эффективных изоляционных материалов позволит снизить затраты топлива еще на 5–10 %. В итоге будем иметь

$$\Sigma \eta_{\text{техн}}^{\text{ф}} = \eta_{\text{техн}} + \Delta \eta_{\text{техн}}^{\text{ф}} + \Delta \eta_{\text{техн}}^{\text{фут. мат}},$$

где $\eta_{\text{техн}}$ – КПД без регенеративного и утилизационного теплоиспользования ($\eta_{\text{техн}} \cong 15\%$); $\Delta\eta_{\text{техн}}^{\Phi}$ – добавка (снижение затрат топлива) от регенеративного теплоиспользования, $\Delta\eta_{\text{техн}}^{\Phi} \cong 10\%$; $\Delta\eta_{\text{техн}}^{\text{фут. мат}} \cong 10\%$.

Таким образом:

$$\Delta\eta_{\text{техн}}^{\Phi} \cong 15 + 10 + 10 \cong 35\%.$$

Как видим, реально технологический КПД нагревательных и термических печей машиностроительных и автотракторных производств республики может находиться на уровне 35–37%. Сегодня же он составляет величину 15–5% и менее.

Для реализации КПД установок на уровне 35–37% необходимо внедрение систем автоматического (ручного) теплового регулирования нагрузки многозонного объекта (две-три зоны регулирования).

Можно предложить блок-схему автоматического (с элементами ручного) регулирования многозонного объекта, пригодную как для нагревательных, так и для термических печей заводов Республики Беларусь (рис. 1).

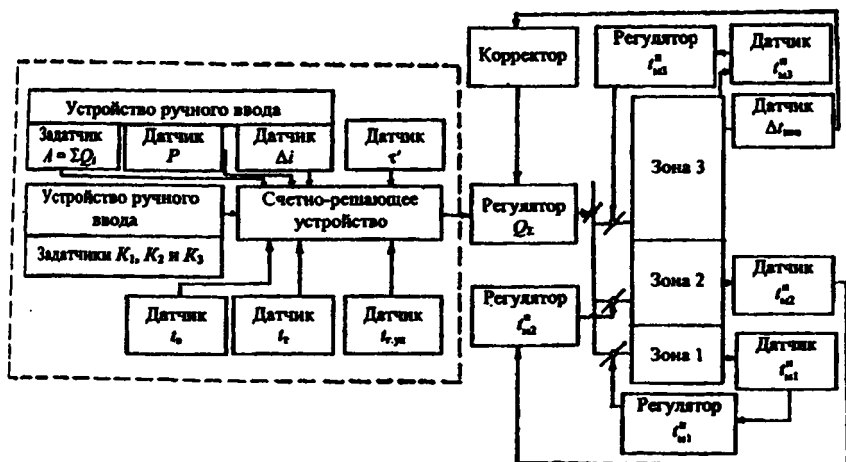


Рис. 1. Блок-схема регулирования тепловой нагрузки многозонной печи

Схема (рис. 1) предусматривает коррекцию работы регулятора Q_{Σ} по температуре подогрева воздуха-окислителя, что выгодно отличает ее от имеющихся и внедренных в промышленности. Схема получена с учетом уравнения регулирования тепловой нагрузки

$$Q_{\Sigma} = \frac{p\Delta t\tau'}{1 + k_1t_b + k_2t_T - k_3t_{г.ух}},$$

где τ' – темп толкания садки (предполагается проходная конструкция печи).

Также нужно определиться с существующей классификацией цехов и характером производства заводов машиностроительного и автотракторного профилей, которые имеются в Республике Беларусь, так как это в значительной (подавляющей) мере определяет выбор энергоносителя (электроэнергия либо органическое топливо).

В Беларуси нет промышленных предприятий (за исключением подшипникового завода № 11) с массовым характером производства (РУП «Минский автомобильный завод» и ПО «Минский тракторный завод» – это предприятия с серийным, даже не с крупносерийным и тем более не с массовым характером производства).

Развитие парка печей в нашей стране может происходить только при наличии газообразного и жидкого топлива (отсюда и появились на белорусских заводах комбинированные горелочные устройства КГМГ, на случай провала топливно-энергетического баланса).

Машиностроительные и автотракторные предприятия Республики Беларусь классифицируются по группам производственных комплексов (цехам). Это:

- заготовительный комплекс завода (цехи: собственно заготовительные, стале- и чугунолитейные, кузнечные, цехи сварки корпусных изделий);
- механосборочный комплекс завода (в основном это цехи сборки, РМЦ, цехи экспериментальной разработки, механические, РМЦ и др.).

Цехи заготовительного и механосборочного комплексов имеют как нагревательные, так и термические печи. Однако печи этих производств значительно отличаются друг от друга, а следовательно, модернизацию их парка нужно рассматривать с разных позиций

в рамках заготовительного и механосборочного производств и при условии, что нагревательные и термические печи заготовительного производства должны быть унифицированы для всех заводов Республики Беларусь. Печи механосборочного производства должны быть также представлены единым типорядом пламенных печей.

Заготовительное производство. Заготовительные цехи содержат и нагревательные, и термические печи (в основном это ЛЦ и кузнечные цехи или корпуса):

а) нагревательные печи для предприятий Республики Беларусь должны представлять единый типоряд пламенных проходных (методические и полуметодические) печей с единым типоразмером для всех заводов (типоряд по производительности). Итак, типоразмерный ряд «близнецов»: 0,4; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0 (5,0; 10,0) т/ч – всего в типоряду шесть типоразмеров пламенных печей;

б) термические печи (как уже сложилось для предприятий Республики Беларусь) также должны быть представлены одним типорядом проходных печей для отжига модифицированного чугуна в защитной атмосфере (к примеру, азота) и одним типорядом термических пламенных проходных печей для термоулучшения стального литья (закально-отпускные агрегаты: закалочная печь – закалочный бак – печь отпуска).

Типоряд по производительности пламенных печей для отжига чугуна должен включать проходные печи трех типоразмеров: 5; 15 и 30 т/ч.

Типоряд печей (по производительности) пламенных проходных для термоулучшения стального литья (закально-отпускные агрегаты) одного типоразмера: 1,0–1,2 т/ч.

Механосборочное производство (цехи сборочные, механические и др.). Здесь преобладает термическая обработка. В основном это закалка и отпуск, а также цементация (химико-термическая обработка). Для реализации операций термической обработки необходимо иметь:

- закально-отпускной (пламенный) проходной агрегат производительностью 1,0–1,2 т/ч (один типоразмер);
- цементационно-закально-отпускной агрегат (контролируемая атмосфера), пламенный, производительностью 2,0 т/ч (всего один типоразмер в типоряду).

Как и в случае заготовительного производства, здесь не следует разрабатывать другие нагревательные устройства ни по типорядам, ни по типоразмерам в типорядах.

Рассмотрим подробнее модернизацию газопечного хозяйства. Модернизация должна обеспечить КПД печей заготовительного и механосборочного производств на уровне 35–37 %. Сегодня парк печей имеет КПД 5–15 %, т. е. модернизацию нужно организовать в направлении возрастания КПД вдвое, а в отдельных случаях – втрое. Как мы уже заметили, такая возможность имеется и ее реализация вполне реальна.

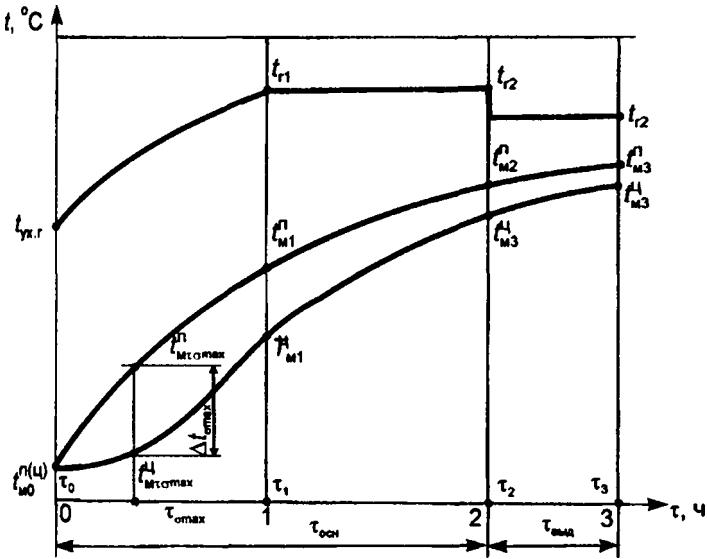
Модернизация состоит в основном в создании парка печей проходных (методических и полуметодических) заготовительного и механосборочного производств, обладающих КПД не менее 35–37 % и удовлетворяющих требованиям существующих заводских теплотехнологий, а также с учетом возможности инновационных технологических процессов на ближайшие 15–20 лет (автоматизация загрузки и выгрузки, перемещения садки в пределах рабочего пространства, внедрение новых схем автоматического (ручного) регулирования тепловой нагрузки зон рабочего пространства, внедрение хорошо управляемых горелочных устройств и др.).

На основном этапе модернизации работы должны быть направлены на разработку и систематизацию рациональных режимов и температурных графиков основных (практически всех) тепловых процессов в многозонном нагревательном устройстве, а также на создание надежных схем регулирования процесса, что позволяет максимально приблизить реальный процесс нагрева к разрабатываемому температурному графику и обеспечить экономичный, гарантированный режим нагрева с заданным технологическим качеством поковки и продукта термообработки (рис. 2).

На рис. 2, б представлен фактический температурный график нагрева, максимально приближенный к теоретическому.

Влияние регенеративного теплоиспользования. На рис. 3 показана зависимость экономического эффекта $\mathcal{E}\%$ от $t_{г.ух}$ и $t_{в.о}$. В отличие от качества горения топлива такое влияние более ощутимо и оценивается в 5–15 % при наличии надежного, хорошо зарекомендовавшего себя рекуператора.

a



б

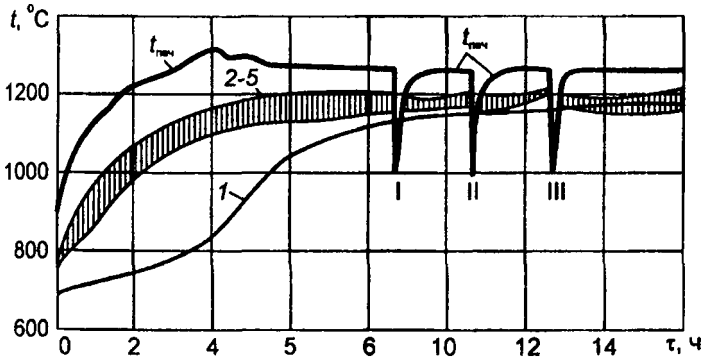


Рис. 2. График нагрева в печи слитка стали 5ХГСВФА: 1 – температура в центре слитка; 2–5 – температура на поверхности слитка; а – теоретический график нагрева; б – действительный график нагрева слитка во временных зонах камерной печи

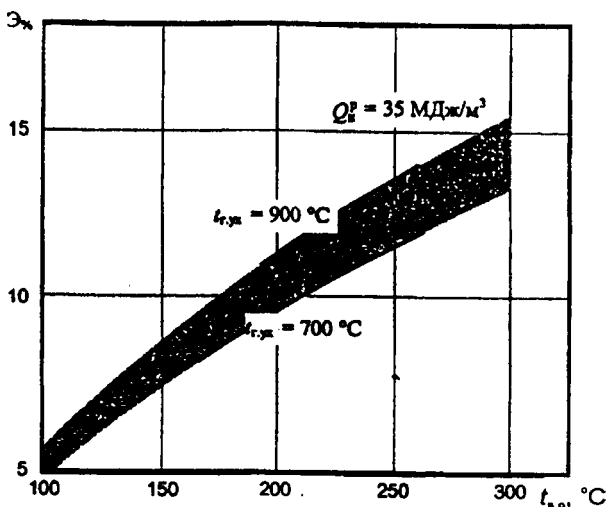


Рис. 3. Графики зависимости $\mathcal{E}_{\%} = f(t_{г.ух}; t_{в.о})$

Графики (рис. 3) построены для природного газа ($Q_{н}^p = 35 \text{ МДж/м}^3$) и рассчитаны по формуле

$$\mathcal{E}_{\%} = \frac{i_{в.о}}{i_m + i_{в.о} - i_{г.ух}} \cdot 100 \%$$

При оснащении печей устройством для регенеративного теплоиспользования целесообразно отказаться от петлевого трубчатого рекуператора, который по ряду объективных причин в ближайшие годы не может быть внедрен на промышленных предприятиях Республики Беларусь.

Следует создать чугунный рекуператор из игольчатых унифицированных элементов, модифицированных кремнием и хромом (никелем). Элемент должен изготавливаться непосредственно литьем чугуна в заводскую литейную форму с механической доработкой по месту. Необходимы унифицированные типоряды «М-I» или «М-II» (без наружного оребрения). Типоряд должен быть выполнен по производительности печи: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0 (5; 10) т/ч и

по температуре: 100; 150; 200 и 250 °С (возможны типоразмеры, соответствующие температуре подогрева воздуха-окислителя до 300 °С). Рекуператор должен иметь два модуля «М-I» и «М-II», быть взаимозаменяемым и применим для любой нагревательной либо термической печи.

Внедрение рекуперативного (не утилизационного) теплоиспользования – это мощный рычаг для повышения КПД печи. Эффект от подогрева воздуха-окислителя складывается из $\Delta\%$ (рис. 3) и топливного эквивалента подогрева $\Delta_{\text{под}}$

$$\Delta B = B \Delta\% \Delta_{\text{под}} = B \Delta\% \frac{1}{\eta_{\text{и.т}}}$$

Это обеспечивает 10–12 % снижения удельного расхода топлива на нагрев (термообработку) против 0,1–0,5 % от модернизации горелочных устройств.

Влияние теплопотерь через ограждающую конструкцию (футеровочный и теплоизоляционный слой). На данный момент разработаны и серийно изготавливаются в Украине и Российской Федерации принципиально новые материалы для кладки печей. У таких материалов коэффициент теплопроводности вдвое, а в подавляющих случаях на порядок ниже существующего у применяемых сегодня в Республике Беларусь материалов [1–4]. Это свидетельствует о том, что, применяя такие футеровочные (к примеру, карбидкремниевые и теплоизоляционные (легковесные волокнистые) материалы, можно повысить КПД еще на 10 %.

Влияние внешнего (утилизационного) теплоиспользования. Утилизационное использование теплоты не может повысить технологический КПД печи, однако положительный эффект от утилизационного теплоиспользования в полной мере скажется на энергетическом КПД $\eta_{\text{эн}}$ системы «печь – рекуператор – утилизатор». При чем $\eta_{\text{эн}} > \eta_{\text{техн}}$ на величину дополнительного энергоносителя,работанного в устройстве для внешнего теплоиспользования $Q_{\text{доп.техн.пр}}$:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{Q_1 + Q_{\text{доп.техн.пр}}}{(B - \Delta B) Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot 100 \%$$

Но, к сожалению, внедрение комбинированного (регенеративного и утилизационного) теплоиспользования связано с определенными сложностями. Правда, имеются отдельные теплотехнологии термической обработки (закально-отпускной агрегат, термооблучение стального литья), где отпускная печь может работать на тепловых отходах закалочной печи (рис. 4).

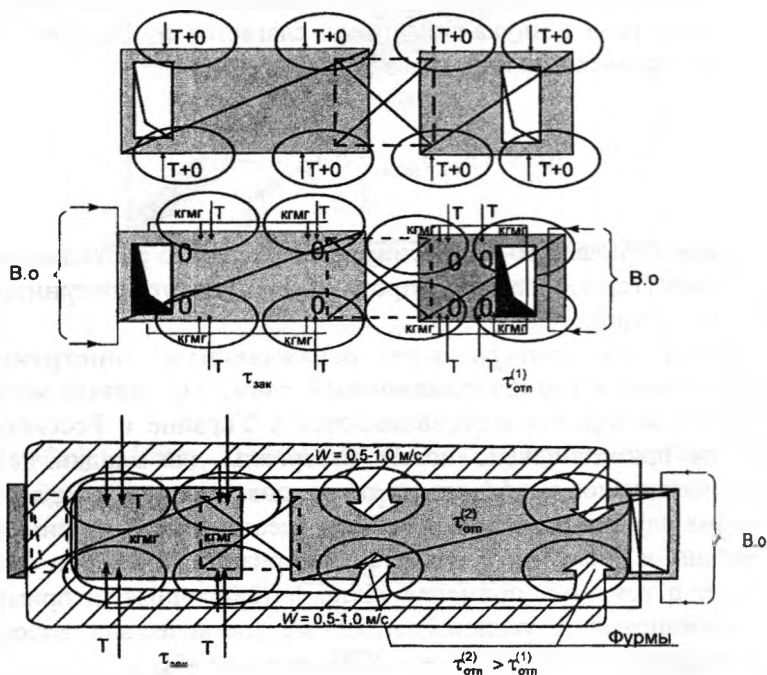


Рис. 4. Возможные схемы теплоиспользования тепловых отходов закально-отпускного агрегата (термооблучение) стального литья: а – без использования тепловых отходов ($\eta = 5-10\%$); б – с регенеративным теплоиспользованием ($\eta = 35-37\%$); в – с комбинированным теплоиспользованием ($\eta = 35-37\%$; $\eta_{заж} = 60\%$)

Модернизация печного хозяйства промышленных предприятий Республики Беларусь – длительный и очень серьезный процесс, в котором звенья всех работ должны быть воссоединены в единую логическую и последовательную цепь.

В связи с особенностями современной энергетики «энергосбережение» (снижение удельной нормы расхода условного топлива) приобретает статус основной энергетической проблемы современности.

Основные пути ее решения известны:

- 1) повышение КПД (снижение удельных расходов энергоресурсов) установок как потребляющих, так и генерирующих;
- 2) использование вторичных энергоресурсов (ВЭР);
- 3) наведение должного порядка в использовании энергоресурсов;
- 4) реструктуризация промышленности;
- 5) использование рациональных технологий;
- 6) рациональное построение теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСШ).

Возможности первых двух направлений во многом реализованы, поскольку именно они традиционно были в области ведения энерготехнологов, а потому достаточно изучены и в определенном смысле представляют меньший интерес. Для них, как правило, характерна традиционная методическая основа решения проблемы энергосбережения, отличающаяся дискретностью энергетического анализа в рамках отдельных агрегатов и частных мероприятий. И повышение энергетического КПД, и увеличение степени утилизации ВЭР требуют меньшей популяризации. В отношении КПД отдельно взятых агрегатов следует отметить, что для многих из них и, прежде всего энергетических, достигнуты значения, близкие к практически достижимым. Утилизация ВЭР в своей реализации наталкивается на проблемы временных дисбалансов потребления и генерации, аккумуляции, очистки энергоносителей, обратной пропорциональности стоимости использования энергоресурса и его температурного уровня.

Третий путь характеризуется значительно большей актуальностью. Исторически сложились такие отношения, когда энергия, являясь одним из важнейших ресурсов, до последнего времени, к сожалению, таковым не считалась, а потому ее использованию не уделялось должного внимания. Сегодня произошло признание энергии дорогостоящим ресурсом, и в этой связи заметно изменение в энергоиспользовании. Вместе с тем еще требуется время для

достижения понимания, в первую очередь руководящим звеном, что для действительно эффективного использования этого дорогостоящего ресурса необходима кропотливая управленческая работа. Осознание важности этой работы является первым шагом на пути экономии топлива на предприятии. Осложняется ситуация и тем обстоятельством, что подходы к энергетическому управлению могут быть различными. Выбор зависит от сочетания многих факторов, прежде всего, индивидуального состояния предприятия и достигнутого уровня энергетического управления на нем. Обязательными являются достижение и сохранение контроля над энергопотреблением и инвестирование мероприятий по изменению энергопотребления.

В соответствии с возможностями предприятия необходимо ранжировать предполагаемые мероприятия с учетом их эффективности и стоимости. Новые, непрерывно появляющиеся технологии энергообеспечения производственных процессов будут требовать дополнительных вложений денежных средств. В этой связи необходимы шаги по созданию информационной системы энергетического управления, обеспечивающей оперативную, всеобъемлющую информацию для всех звеньев, которым она необходима. Требуется постоянная поддержка руководства мер по привлечению квалифицированного энергетического персонала, соответствующего финансирования работ, динамического отслеживания ситуации, в том числе и в вопросах новых технологий энергообеспечения материального производства. В этой ситуации целесообразность энергетического управления становится очевидной. Вопросы энергетического управления включают:

- отслеживание текущего состояния энергетического управления;
- энергетическую политику, состоящую в создании официальной заинтересованности в энергетическом управлении на предприятии;
- организационные вопросы по неформальному внедрению во все управленческие структуры предприятия энергетического аспекта;
- развитие мотивации, стимулирующей энергосбережение у потребителей энергии и создающей эффективные взаимоотношения с ними;

- создание действенной информационной системы;
- пропаганду и рекламу энергетического управления на всех этапах технологического цикла;
- выбор проектов и обоснование вложений в изменение эффективности энергоиспользования;
- возможные варианты финансирования мероприятий.

Очевидно, что на всех стадиях необходимо ответственное лицо – энергетический управляющий. Задачи и обязанности его на первоначальном этапе следующие:

- формулирование и выполнение энергетической политики;
- сбор и анализ информации об энергопотреблении и выбросах в окружающую среду;
- регулярное информирование руководства и всех лиц, ответственных за энергопотребление, о текущей ситуации;
- контроль выгодности приобретения энергоресурсов и их расходования;
- информация о проблемах энергетики для всего предприятия;
- внедрение эффективной эксплуатационной практики, разработка и отслеживание соответствующих административно-хозяйственных мероприятий;
- распространение опыта энергосбережения;
- выявление и экономическое обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности;
- разработка инвестиционной программы по снижению энергопотребления и загрязнения окружающей среды;
- введение и сопровождение процедур оценки экономической эффективности мероприятий энергетического управления.

Переходя к оценке четвертого пути, нельзя не согласиться с тем, что при всей заманчивости реструктуризация промышленности с целью ее переориентации на выпуск продукции, не связанной с большими затратами энергоресурсов, весьма проблематична. Трудности связаны, прежде всего, с необходимостью изменения сложившейся системы на международном рынке распределения выпуска и потребления продукции.

Разработка малозатратных в энергетическом плане технологий не относится к компетенции специалистов в области промышлен-

ной теплоэнергетики, но именно при его реализации крайне важно участие названных специалистов. Это вытекает из анализа временной структуры причин рассеяния энергии в технической системе. Для нее характерны три составляющие. Первая и меньшая связаны со стадией эксплуатации, на которую приходится 2–10 % возможностей снижения потерь. Оставшиеся 8–10 % распределяются примерно поровну между двумя другими стадиями: созданием идеологии ТЭСП, когда закладывается концепция энергообеспечения выбранного технологического процесса предприятия, и непосредственно проектированием и строительством.

Для более полного понимания ситуации энергетику страны можно представить следующим образом (рис. 5) [5].

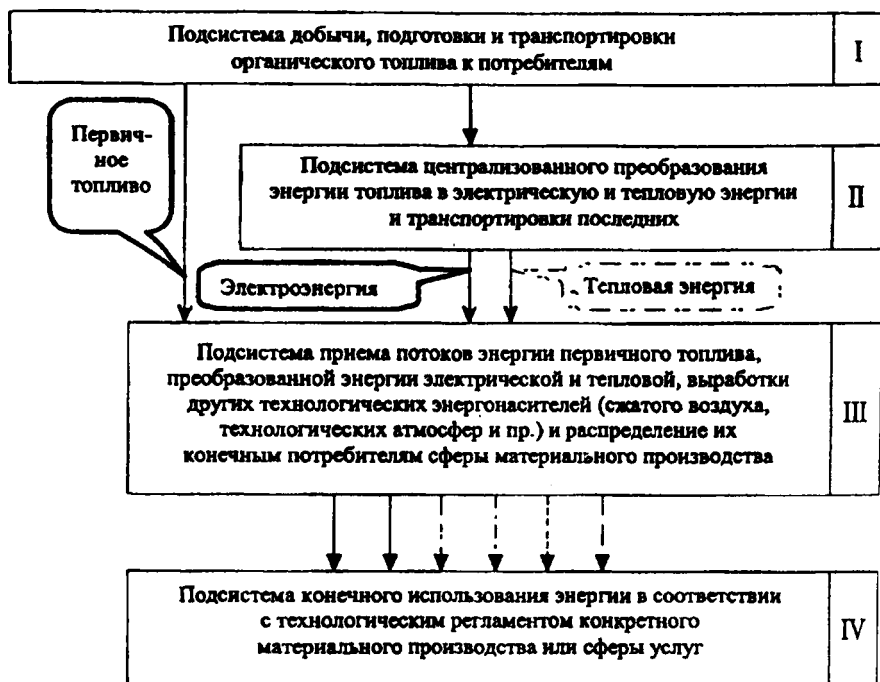


Рис. 5. Принципиальная структурная схема энергетики материального производства

На первых трех составляющих ее подсистем привлекаются к работе специалисты-энергетики. В частности, к третьей подсистеме относится служба главного энергетика промышленного предприятия. Для этих подсистем в совокупности коэффициент преобразования энергии не опускается ниже 25 %. Четвертая подсистема в большинстве случаев – теплотехнологическая, что вытекает из структуры энергопотребления промышленного производства. Коэффициент использования первичной энергии здесь крайне редко превышает 5–10 %, опускаясь в ряде случаев ниже 2 %. Традиционный подход к энергообеспечению теплотехнологических процессов отличается дискретностью энергетического анализа в узких границах отдельных теплотехнологических агрегатов и в рамках частных мероприятий, что абсолютно недостаточно для достижения уровня эффективного использования энергии. Предпосылкой радикального сдвига в изменении ситуации с энергообеспечением теплотехнологии в системах преобразования вещества является внедрение методологии системного подхода к обеспечению теплотехнологических производств и комплексного проведения соответствующих мероприятий, не относящихся напрямую к теплотехнологическому оборудованию (например, разработка генерального плана завода, обеспечивающая минимальное перемещение сырья, обустройство складов, транспортеров в плане блокирования путей увлажнения последнего и т. д.). Крупномасштабное энергосбережение возможно лишь в рамках отраслевого технологического комплекса на основе рационального построения его структуры.

Общезвестно, что оптимизацию сложных комплексов, к которым относятся и ТЭСПП, по любой целевой функции можно вести только на основе системного подхода. В сугубо энергетическом аспекте для этого следует:

- использовать иерархический принцип создания ТЭСПП, когда собственные энергогенерирующие мощности, отделенные непосредственно от технологического процесса, вводятся в ее структуру лишь для покрытия дисбалансов;
- применять компоновку оборудования, позволяющую реструктурировать ТЭСПП после эксплуатации объекта в течение определенного отрезка времени, необходимого для мониторинга системы и индивидуальной оптимальной доработки состава подсистем, из

чего вытекает необходимость многоэтапного финансирования создания объекта.

При построении ТЭСПП следует ориентироваться на блокирование путей потерь эксергии на всех стадиях протекания теплотехнологических процессов, прежде всего интеграцией взаимодополняющих теплотехнологий с большими внутренними потерями эксергии у одной на горячем, у другой – с большими внешними потерями эксергии на холодном торцах технологического процесса.

Сегодня очевидно, что энергетически рациональное построение теплотехнологической системы предприятия, в первую очередь, учитывает требования второго закона термодинамики. Как отмечалось, блокирование путей внутренних потерь эксергии, которые не могут быть определены из баланса энергии, и составляет основу эффективного энергообеспечения теплотехнологического процесса. Общий анализ систем, отличающихся энергетической рациональностью, показывает, что в наборе оборудования, образующего их структуру наряду с теплотехнологическими агрегатами, характерными для данной технологии, дополнительно появляются устройства с общими функциями, не зависящими от специфики технологий. Введение таких дополнительных подсистем в структуру теплотехнологической системы предприятия обеспечивает рациональность ее построения и повышает эффективность энергоиспользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ладыгичев, М. Г.* Огнеупоры для нагревательных и термических печей: справ. – 2-е изд., доп. / М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский, И. Д. Кашеев. – М.: Теплотехник, 2004. – 256 с.
2. *Кашеев, И. Д.* Свойства и применение огнеупоров: справ. / И. Д. Кашеев. – М.: Теплотехник, 2004. – 352 с.
3. *Пивинский, Ю. Е.* Неформованные огнеупоры: справ.: в 2 т. – Т. 1. Кн. 1: Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. – 2-е изд. – М.: Теплотехник, 2004. – 448 с.
4. Неформованные огнеупоры: справ.: в 2 т. – Т. 2 / под ред. И. Д. Кашеева. – 2-е изд. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
5. *Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. – Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.].* – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 487 с.