

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

И. Б. Одарченко, Л. Н. Русая

ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

КУРС ЛЕКЦИЙ

**для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2008

УДК 621.745;621.311(075.8)
ББК 34.61я73
О-40

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 17.04.2006 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Обработка материалов давлением» ГГТУ им. П. О. Сухого д-р техн. наук,
проф. *М. Н. Верещакин*

Одарченко, И. Б.
О-40 Основы энергосбережения : курс лекций для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства» днев. и заоч. форм обучения
/ И. Б. Одарченко, Л. Н. Русая. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 86 с. – Систем. требо-
вания: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD
16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. –
Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-758-2.

Изложены цели и задачи энергетического менеджмента, рассмотрены энергетические ресур-
сы и их потребление в Республике Беларусь, экологические эффекты энергосбережения, а также во-
просы эффективного использования технологического оборудования в литейном производстве.

Для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.745;621.311(075.8)
ББК 34.61я73

ISBN 978-985-420-758-2

© Одарченко И. Б., Русая Л. Н., 2008
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Литейное производство очень энергоемко. Основные затраты энергоносителей идут на технологические нужды: плавку и доводку металла, сушку стержней и формовочных материалов, термическую обработку отливок, резку, заварку дефектов при исправлении брака литья. Существенные затраты энергии идут на сжатый воздух. В каждом технологическом переделе имеются резервы для снижения расхода энергоресурсов.

Снижение расхода энергоносителей в производстве литых заготовок играет важную роль в повышении конкурентоспособности современного литейного производства и его стабильного функционирования, т. к. цена на энергоносители растет и в себестоимости отливок занимает существенное место.

В Республике Беларусь для решения проблем энергосбережения приняты Закон об энергосбережении, система государственных программ, создана система управления энергосбережением, издается республиканский журнал «Энергоэффективность», а также серия книг.

В учебной литературе, изданной в Республике Беларусь для курса «Основы энергосбережения», вопросы энергосбережения в литейном производстве не рассматриваются.

В предлагаемом материале рассмотрены наиболее применяемые в последнее время процессы в производстве отливок, их энергоемкость и технологические возможности при их использовании. Основное внимание уделено процессам и оборудованию, применяемым в отечественной и зарубежной практике.

Цель настоящего курса лекций – дать возможность студентам-литейщикам осознать направления и пути решения проблемы энергосбережения.

При разработке материала использованы тематические материалы, предложения, анализы исследований, реферативные сборники отечественных и зарубежных специалистов, отчеты специалистов по посещениям фирм и предприятий в индустриально-развитых странах, семинаров и симпозиумов.

Курс лекций предназначен для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» специализаций 1-36 02 01 01 «Техническая эксплуатация литейного оборудования» и 1-36 02 01 04 «Организация и управление литейным производством» дневной и заочной форм обучения.

1. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

1.1. Энергетический менеджмент – часть общего менеджмента

Управление (управленческая деятельность, менеджмент) – это процесс планирования, организации, мотивации и контроля с целью формулирования и достижения целей управляемой организации [1]. Основная цель менеджмента является миссией менеджмента, другие цели выступают в качестве подцелей. Под организацией понимается любое объединение людей для единой экономико-хозяйственной деятельности: международные объединения, государства, предприятия, фирмы, учреждения и т. д. Менеджеры занимают должности руководителей организационных подразделений и выполняют управленческие функции, классифицируемые на три категории: межличностные роли, информационные и роли по принятию решений.

Условием развития цивилизации человечества является использование энергии. Энергетика – отрасль теоретических и прикладных знаний об использовании энергии. Под использованием энергии понимают производство, преобразование, транспорт, распределение и применение энергии.

В процессе развития человечеству требуется все большее количество энергии. Запасы традиционных видов энергоресурсов ограничены. Пагубность влияния их использования на окружающую среду становится все значительней. Во всем мире экологическим последствиям увеличения энергопотребления уделяется все больше внимания. Организация рационального энергопотребления с минимальным экологическим влиянием при экономном использовании первичных энергоресурсов и разумном удовлетворении технологических и бытовых потребностей во всех видах и формах энергии становится общей заботой человечества.

Существует важная проблема – энергообеспечение и рациональное энергопотребление. Решение этой проблемы – непрерывный динамический процесс, требующий согласованных одновременных действий всех государств, организаций и отдельных людей и включающий технические и социально-экономические аспекты. Решение этой проблемы составляет основную суть и цель энергетического менеджмента – новой отрасли знаний и опыта человека. Эта отрасль аккумулирует опыт и прогресс человечества по использованию энергии и достижения современного менеджмента как сформировавшейся системы теоретических знаний, практических методов и инструмен-

тария управления. Зародившись в индустриально развитых странах Западной Европы, в Японии, США в 60–70-х гг. как результат преодоления энергетического кризиса, новая самостоятельная система – синтез гуманитарных и технических знаний и опыта – энергетический менеджмент формируется на стыке менеджмента и технологий.

Таким образом, **энергетический менеджмент – методологическая наука с практическим инструментарием для осуществления процесса управления использованием энергии, т. е. планирования, организации (внедрения), мотивации, контроля оптимального использования всех видов и форм энергии при целесообразном удовлетворении потребностей человека (организации) и минимальном отрицательном влиянии на окружающую среду.**

В определении энергетического менеджмента существуют все элементы процесса управления: планирование, организация, мотивация, контроль, – присутствующие в определении общего менеджмента и формулируется цель энергетического менеджмента, которая является подцелью миссии общего менеджмента, – удовлетворение потребностей организации в энергии при минимуме отрицательного влияния на окружающую среду. Следовательно, энергетический менеджмент следует рассматривать как составную часть, как обязательный элемент менеджмента.

Методы и результаты энергоменеджмента как прикладной науки необходимы для успешного функционирования любой организации, начиная от международных образований, государств и заканчивая семьей. Энергетический менеджмент осуществляется на всех вертикальных и горизонтальных уровнях управления организаций.

Специалист по энергетическому менеджменту – человек, выполняющий управленческие функции для достижения целей энергетического менеджмента как подцелей миссии менеджмента в данной организации. Чтобы организовать эффективное и щадящее по отношению к окружающей среде потребление энергии, нужны систематические и основательные знания для действий в области технологии, организации и поведения.

Специалисты по энергетическому менеджменту должны обладать определенным мировоззрением и широким спектром социальных, психологических, экономических и технических знаний. Эти специалисты необходимы на всех уровнях управления во всех организациях.

В странах Европейского Союза, в США, Японии уже сложилась кадровая структура энергетического менеджмента, определились

функциональные обязанности и права при достаточно высоком уровне энергоменеджмента и его специфике в каждой стране и организации. Анализ опыта этих стран показывает, что без государственных политики и программ энергосбережения, без создания системы энергетического менеджмента невозможно преодолеть экономический кризис и достичь стабильного социального и экономического развития. Активно развивается энергетический менеджмент в нашей республике и других странах СНГ. Важнейшими элементами системы энергоменеджмента стали:

1) образование Государственного комитета по энергосбережению и энергонадзору в 1993 г., возглавляющего и координирующего работу по энергосбережению в республике;

2) принятие Государственной программы «Энергосбережение» в 1995 г. и Закона об энергосбережении в 1998 г.

Активная организационная и практическая работа по реализации принятых концепций и программ, внедрение энергоэффективных технологий вывели Республику Беларусь на передовые позиции в области энергосбережения среди других стран СНГ. Энергоэффективные технологии понимаются и в широком смысле как практический инструментарий процесса управления эффективным использованием энергии, т. е. совокупность методик и средств в области организации, технологии и поведения.

Энергетический менеджмент, являясь частью общего менеджмента, повторяет его иерархические структуры. Различают энергоменеджмент макроуровня (на международном уровне, в стране, области, городе, в отрасли экономики и т. п.) и энергоменеджмент микроуровня: внутри предприятия, учреждения, фирмы, в семье.

Цели энергетического менеджмента различны по своему содержанию для организаций разных иерархических уровней:

– **на межгосударственном уровне** – сохранение и рациональное использование мировых запасов энергетических ресурсов, поиск новых источников и форм энергии, поддержание и сохранение окружающей среды для следующих поколений;

– **на государственном (национальном) уровне** – энергетическая независимость и безопасность, а также для стран СНГ – переход от энергозатратной к энергоэффективной экономике;

– **на отраслевом уровне** (энергетика, строительство и т. д.) – энергоэффективное и экологически безопасное функционирование отрасли в рамках национальной экономики;

– **на уровне области, города** – минимум затрат энергоресурсов для обеспечения рациональных комфортных инфраструктур, качества жизни населения при соблюдении экологических норм;

– **на уровне отдельной фирмы, предприятия** – достижение минимальной энергетической составляющей в себестоимости продукции и обеспечение конкурентоспособности продукции по энергетическими экологическими характеристиками на внутреннем и мировом рынках;

– **на уровне семьи** – минимальный счет за потребление энергии при обеспечении комфортных условий жизни.

На каждом из этих уровней предусматриваются свои концепция и технология (методики, средства, способы) энергосбережения.

1.2. Структура и функции энергетического менеджмента

Основная цель энергетического менеджмента – достижение энергоэффективности, энергосбережение. В этом смысле энергосбережение есть часть энергетического менеджмента. В то же время, энергетический менеджмент является инструментом энергосбережения, дающим теорию, методики, практические методы и средства для обеспечения энергоэффективности.

Структуру энергетического менеджмента рассматривают в технологическом и функционально-территориальном разрезах.

Технологическая структура энергетического менеджмента двухкомпонентна и включает в себя «Планирование снабжения (производства) энергоресурсов (Supply Side Planning-SSP)» и «Управление энергопотреблением (спросом на энергоресурсы) (Demand Side Management-DSM)», в совокупности образующие «Согласованное планирование и управление энергоресурсами (Integrated Resource Planning-IRP)». Основой IRP служит «Прогнозирование энергопотребления (Load Forecasting-LF)». Указанные компоненты энергетического менеджмента органически взаимосвязаны и направлены на достижение единой цели – энергоэффективности как результата процесса энергосбережения.

В функционально-территориальном плане система энергетического менеджмента является многоуровневой иерархической. В соответствии с целями энергетического менеджмента отдельных уровней разрабатываются концепция и технологии (методики, средства, способы) энергосбережения для каждого уровня. Цели, интересы отдель-

ных уровней не всегда совпадают, поэтому функционально-территориальные уровни иерархии энергоменеджмента связаны регулирующими воздействиями верхних уровней. Таким образом, энергетический менеджмент имеет продольно-поперечную структуру, предусматривающую горизонтальные управляющие прямо-обратные воздействия внутри каждого уровня и вертикальные регулирующие воздействия между уровнями. Вертикальные воздействия между уровнями могут быть ограничивающими и стимулирующими экономического, информационного и энергетического характера, направленными сверху вниз, т. е. прямыми, и обратными воздействиями – информационными и финансовыми, направленными снизу вверх.

В условиях рыночной экономики, как показывает опыт развитых индустриальных стран, управление с верхних уровней осуществляется в основном посредством ограничений и стимулов. Имея в виду этот принцип в перспективе необходимы прямые государственные регулирующие воздействия на нижние уровни. Результативность энергетического менеджмента на национальном уровне оценивается по следующим критериям:

– по форме национальной кривой нагрузки: большей энергоэффективности соответствует более пологая кривая нагрузки, которая отражает распределение в течение суток потребления страной энергии;

– по макроэкономическим показателям, прежде всего энергопотреблению на душу населения, энергоемкости национального (внутреннего) валового продукта, интегральным экологическим показателям;

Рассмотрим функции субъектов энергетического менеджмента (органов управления) верхнего уровня (Министерство экономики, Государственный комитет «Белэнергосбережение», концерны «Белэнерго», «Белтопгаз» и т. д.), которые обеспечивают решение задач и результативность менеджмента:

1. Законотворческая и правовая деятельность – определяющее звено энергоменеджмента, регламентирующее все его остальные функции. Правовые основы исполнения функций энергетического менеджмента закреплены Законом «Об энергосбережении». Государственная программа «Энергосбережение» определила на период до 2000 г. формы, фактическое содержание механизмов их исполнения.

2. Поиск источников и распределение финансирования. Залог успеха этой функции, с одной стороны, заключается в оптимально обоснованном соотношении источников финансирования и в формировании их наилучшей внутренней структуры за счет экономической

политики, с другой стороны – в обоснованном с учетом приоритетов распределении финансирования на задачи программы «Энергосбережение». Среди источников финансирования следует назвать государственный и отраслевые фонды энергосбережения, фонды предприятий, кредиты, лизинг, международные источники.

3. Энергоаудит национальной экономики имеет цель, во-первых, оценку потенциала энергосбережения, его структуры для учета при планировании развития экономики и для разработки энергосберегающей политики, а во-вторых – оценку результатов энергетического менеджмента для ее коррекции.

4. Выработка и координация реализации национальной политики энергосбережения, т. е. концепции, методик и средств для различных уровней, в том числе экономической, технической, социальной политики, научных изысканий, образования, международного сотрудничества. Основными механизмами и инструментами экономической политики энергосбережения являются: реструктуризация экономики и управление ею, тарифообразование, нормирование и стандарты, стимулирование, налогообложение, льготирование и т. д. Актуальными направлениями технической политики энергосбережения являются: оптимизация структуры генерирующих мощностей, рациональное соотношение централизации и децентрализации энергоснабжения, комбинированная выработка тепловой и электрической энергии, использование газотурбинных установок, возобновляемых источников энергии, аккумулярующих систем, энергосберегающих технологий и оборудования и др. Существенное значение имеют элементы социальной политики энергосбережения, направленные на повышение качества жизни населения, улучшение экологии. В том числе – просветительно-пропагандистская работа, реклама, социальная помощь, благотворительность. Важную роль играет политика научных изысканий. Координация этих аспектов гарантирует решение энергетической проблемы для будущих поколений. Важным является и организация непрерывной многоуровневой системы образования в области энергосбережения. Полноценный энергоменеджмент предполагает как обязательную функцию коррекции политики энергосбережения в реальном времени и на перспективу.

5. Надзор, экспертиза и контроль – функция, регламентируемая законодательством и обеспечивающая работу системы энергосбережения; охватывает всю технологию энергоиспользования во всех отраслях экономики и социально-интеллектуальной сфере. Значительный эффект дает экспертиза конструкторско-проектных решений.

6. Организация приоритетных энергосберегающих проектов (от объявления тендеров до стимулирования их выполнения) и эффективной системы консалтинга, аудиторских фирм. Это позволяет активизировать энергосбережение, прежде всего на предприятиях, способствует распространению и внедрению наиболее передовых энергосберегающих технологий и оборудования. Одновременно данная функция используется как косвенный инструмент для регулирующих воздействий на нижние уровни энергоменеджмента.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И ИХ ПОТРЕБЛЕНИЕ

2.1. Основные понятия

Энергетические ресурсы – это материальные объекты, в которых сосредоточена энергия, пригодная для практического использования человеком.

Энергия, непосредственно извлекаемая в природе, называется первичной, а носители первичной энергии называются первичными энергоресурсами.

Различают невозобновляемые и возобновляемые виды энергии и, соответственно, невозобновляемые и возобновляемые энергоресурсы. Невозобновляемые энергоресурсы – те, которые ранее были накоплены в природе и в новых геологических условиях практически не образуются, например, уголь, нефть, природный газ.

Возобновляемые энергоресурсы – те, восстановление которых постоянно осуществляется в природе, например, энергия ветра, биотопливо, энергия морских волн и т. д.

Особое значение среди всех видов энергоресурсов имеет энергия Солнца, для которой существует два толкования. С одной стороны, все виды энергоресурсов – результат естественных преобразований солнечной энергии. Это и химическая энергия, запасенная в органическом топливе: под действием солнечных лучей хлорофилл растений разлагает углекислоту, поглощаемую из воздуха, на кислород и углерод; последний накапливается в растениях. Уголь, природный газ, торф, сланцы и дрова – это запасы лучистой энергии Солнца, извлеченные хлорофиллом в виде химической энергии. Энергия воды также получается за счет солнечной энергии, испаряющей воду и поднимающей пар в высокие слои атмосферы. Энергия ветра, используемая в ветряных двигателях, возникает в результате различного нагревания Солнцем Земли в разных местах. С другой стороны, при более узком толковании под солнечной

энергией имеют в виду непосредственно излучение Солнца на поверхность Земли. Солнце играет основную роль в тепловом балансе Земли. Мощность его излучения, приходящегося на Землю, во много раз больше мощности явлений природы и мощностей, получаемых и используемых человеком. На 1 км^2 поверхности Земли приходится средняя мощность излучения Солнца, равная $17 \cdot 10^4$ кВт, и средняя мощность использования первичных энергоресурсов, равная примерно 19 кВт. Эти мощности значительно, почти в 10^4 раз различаются между собой. Однако суммарная мощность всех электростанций мира – $2 \cdot 10^9$ кВт – уже соизмерима с мощностью многих явлений природы. Так, средняя мощность воздушных течений на планете составляет $(25-35) \cdot 10^9$ кВт. Такого же порядка средняя мощность ураганов – $(30-40) \cdot 10^9$ кВт. Суммарная мощность приливов равна $(2-5) \cdot 10^9$ кВт. Проводя сопоставление мощностей, следует учитывать, что кроме стационарных электростанций имеется большое число передвижных энергетических установок. Например, мощность всех действующих пассажирских самолетов на планете составляет не менее $0,15 \cdot 10^9$ кВт, что соизмеримо с мощностью всех электростанций стран СНГ.

Различные виды энергетических ресурсов обладают разным качеством, которое характеризуется энергоемкостью топлива. Удельной энергоемкостью называется количество энергии, приходящееся на единицу массы физического тела энергоресурса.

Для удобства сопоставления различных видов энергоресурсов и возможности расчетов расход всех видов топлива сравнивается с расходом так называемого условного топлива.

Условное топливо – расчетная величина, принятая для сравнения энергетической ценности различных топлив. За условное принято такое топливо, при сгорании 1 кг которого выделяется $29,3 \cdot 10^6$ Дж, или 7000 ккал энергии. В табл. 1 приведены значения удельной энергоемкости для ряда энергетических ресурсов в сравнении с условным топливом.

Таблица 1

Значение удельной энергоемкости

Виды топлива	Условное топливо	Уголь антрацит	Дрова сухие	Нефть	Газ пропан	Водород
Удельная энергоемкость, $\times 10^6$ Дж/кг	29,3	33,5	10,5	41,9	46,1	120,6
1 ккал/кг	7000	8000	2500	10000	11000	28800

Высокой энергоемкостью обладают газ и нефть, что во многом определило объемы их потребления. Рост потребления нефти как топлива в 19–20 ст. был обусловлен тремя основными причинами:

- развитием транспорта всех видов;
- значительно лучшими технико-экономическими показателями добычи, транспортировки и использования нефти по сравнению с твердым топливом;
- возможностью получать большие прибыли за счет эксплуатации нефтяных месторождений развивающихся стран.

Такие факторы, как ограниченность природных запасов нефти и газа, невозможность их возобновления определяют недопустимость ориентировки на них как на энергетическое сырье.

Перспективным видом топлива, обладающим в три раза большей удельной энергоемкостью по сравнению с нефтью, является водород. Научно-экспериментальные работы по изысканию экономичных способов промышленного преобразования водорода активно ведутся во всем мире. Запасы водорода неисчерпаемы и не связаны с каким-то регионом планеты. Водород в связанном состоянии содержится в молекулах воды H_2O . При его сжигании образуется вода, не загрязняющая окружающую среду. Водород удобно хранить, распределять по трубопроводам и транспортировать без больших затрат.

В настоящее время водород в основном получают из природного газа, в ближайшем будущем его можно будет получать в процессе газификации угля. Для получения химической энергии водорода используется также процесс электролиза. Последний способ имеет значительное преимущество, т. к. приводит к обогащению кислородом окружающей среды. Широкое применение водородного топлива может решить три актуальные проблемы:

- уменьшить потребление органического и ядерного топлива;
- удовлетворить возрастающие потребности в энергии;
- снизить загрязнение окружающей среды.

2.2. Основные энергоэкономические показатели

Существуют основные макроэкономические показатели, которые характеризуют энергоэффективность экономики государства и позволяют оценить тенденции и темпы в ее изменении.

На основе данных по энерго- и электропотреблению, а также информации о численности населения и объемах валового внутреннего продукта (ВВП) определяются:

1. Энергопотребление на душу населения:
 - а) по первичной энергии;
 - б) по подведенной (к потребителю) энергии;
 - в) по подведенной электроэнергии.

$$E = \mathcal{E}_{\text{сум}} / n, \quad (1.1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{сум}}$ – суммарное потребление соответствующего вида энергии за год; n – численность населения.

2. Энергоемкость экономики – отношение суммарного потребления энергии к объему валового внутреннего продукта:

- а) по первичной энергии;
- б) по подведенной энергии;
- в) по подведенной электроэнергии – электроемкость ВВП.

$$E = \mathcal{E}_{\text{сум}} / \text{ВВП}. \quad (1.2)$$

Анализ этих энергоэкономических показателей позволяет получить представление о развитии ситуации в энергетике и о влиянии экономического кризиса на динамику энергопотребления. Год 1990-й выбран как начало перехода от централизованной к рыночной экономике. Данные этого года отражают сложившуюся за советский период структуру энергопотребления. Изучение показателей за последующие годы и сопоставление их с показателями промышленно развитых стран позволяет сделать ориентировочные прогнозы о перспективном энергопотреблении, наметить задачи и темпы развития энергетического сектора экономики.

Показатели ВВП. В 1990 г. показатель ВВП на душу населения в странах СНГ в среднем равнялся 6,9 тыс., что составляет 43 % от уровня, полученного по странам Европейского Союза. Этот показатель существенно различался и по странам СНГ. Наивысший показатель среднегодового ВВП имела Россия – \$ 8,8 тыс. – 55 % от уровня Европейского Союза, Беларусь имела второй по уровню показатель – \$ 7,3 тыс. – 49 %.

За 1990–1993 гг. абсолютный и удельный объемы ВВП снизились в среднем по странам СНГ на 40 %, за 1990–1995 гг. – на 50 %.

Энергопотребление. Потребление первичной и подведенной энергии на душу населения в 1990 г. в странах СНГ было соответственно в 1,3 и 1,4 раза выше, чем в Европейском Союзе и примерно соответствовало показателю по Германии.

Потребление подведенной электроэнергии в целом по СНГ в 1990 г. соответствовало уровню Европейского Союза.

С 1990 по 1993 г. энерго- и электропотребление в странах СНГ существенно снизилось, однако в значительно меньшей степени, чем показатель ВВП.

Энерго- и электроемкость. В 1990 г. энергоемкость экономики по первичной и подведенной энергии в целом по СНГ была соответственно в 3; 2,7; 2 и 3,5 раза выше, чем в Европейском Союзе, Германии, США и Японии.

За 1990–1993 гг. энерго- и электроемкость экономики в целом по СНГ существенно возросли и стали в среднем в 3,9 раза выше, чем в Европейском Союзе. В основном это обусловлено снижением объемов производства многими предприятиями, которые при этом продолжают потреблять значительное количество энергоресурсов из-за неоптимальности режимов работы оборудования.

Пока в странах СНГ сохраняется неэффективное производство, транспортировка и потребление энергоресурсов. В настоящий период относительно низких мировых цен на топливо, в период реструктуризации экономики и первых признаков ее оживления меры по повышению энергетической эффективности экономики являются чрезвычайно важными для стран СНГ. Оценка состояния энергетики показывает, что при повышении темпов экономического роста к 2025 г. страны СНГ смогут достичь современного уровня энерго- и электроемкости промышленно развитых стран. Энергосбережение должно стать одним из стержней их энергетической политики. В странах СНГ имеется огромный потенциал энергосбережения, и реализация комплексной энергосберегающей политики и отдельных программ по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов должна играть приоритетную роль в международном сотрудничестве стран – членов СНГ и стран дальнего зарубежья.

Оценка эффективности энергопотребления и его прогнозирование необходимы для решения двух важнейших задач энергетического менеджмента:

- 1) разработки стратегии производства и торговли энергоносителями;
- 2) разработки и реализации политики энергоэффективности и энергосбережения во всех отраслях экономики на долго- и краткосрочный периоды.

Политика энергоэффективности – одно из условий стабилизации экономики.

2.3. Краткая характеристика энергетического сектора экономики Республики Беларусь

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) в экономике любого государства является важной составляющей в обеспечении функционирования и развития производительных сил, в повышении жизненного уровня населения. Республика Беларусь относится к ряду государств с дефицитом собственных энергоресурсов. Оптимизация развития и функционирования ТЭК – одно из приоритетных направлений деятельности законодательной и исполнительной власти, всех производителей и потребителей ТЭР для обеспечения конкурентоспособности продукции на мировом рынке. Сказанное подтверждается тем, что основные фонды отраслей ТЭК составляют 25 % производственных фондов промышленности, а ежегодные затраты на энергообеспечение потребителей составляет около 30 % ВВП.

Топливо-энергетический комплекс Республики Беларусь включает: добычу торфа и производство торфобрикетов; добычу нефти и нефтепереработку; разветвленную сеть газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов; производство, передачу и распределение электрической и тепловой энергии.

Объемы топливных ресурсов, ежегодно добываемых на территории республики (топливный торф, нефть, попутный газ, дрова и пр.), находятся на уровне 4,5–5,2 млн т у. т., что составляет около 15 % общей потребности в ТЭР.

В республике разведано более 9000 торфяных месторождений общей площадью в границах промышленной глубины залежи 2,54 млн га и с первоначальными запасами торфа 5,65 млрд т. К настоящему времени оставшиеся геологические запасы оцениваются в 4,3 млрд т, что составляет 75 % от первоначальных.

Месторождения нефти на территории Беларуси сосредоточены в единственной нефтегазоносной области – Припятской впадине. Здесь в период с 1965 по 1999 г. была открыта 181 залежь нефти на 62 месторождениях с суммарными запасами 165 млн т. С начала разработки месторождений добыто 102 млн т нефти и 10,7 млрд м³ попутного газа. Остаточные запасы нефти промышленных категорий составляют 63 млн т, попутного газа – 35 млрд м³.

Беларусь располагает существенными мощностями по переработке и транспортировке нефти. Мощности Мозырского и Новополоцкого НПЗ составляют 41 млн т в год. Однако в 1999 г. на Мозырском НПЗ было переработано 5,3 млн т нефтяного сырья, на

Новополоцком НПЗ (ПО «Нафтан») – 6 млн т сырья. Магистральные нефтепроводы связывают нефтеперерабатывающие заводы с нефтедобывающими регионами Западной Сибири. По южной ветке нефть поставляется из Самары через Брянск на Мозырский НПЗ. Часть нефти поступает транзитом на Дрогобычский НПЗ (Украина) и через Брест – на Плоцкий НПЗ (Польша). По северной ветке нефть поступает из Ярославля на Новополоцкий НПЗ, а затем на Мяжейкяйский НПЗ (Литва) и в Вентспилский порт (Латвия).

Продолжается развитие сети магистральных и распределительных газопроводов. Протяженность магистральных газопроводов – свыше 6 тыс. км. Транспорт газа по ним обеспечивают 7 компрессорных станций суммарной мощностью 710 МВт. Распределение газа по потребителям в стране осуществляется от 193 газопроводов-отводов через систему распределительных газовых сетей 122 газораспределительными станциями. В 1996 г. РАО «Газпром» начато строительство магистрального газопровода «Ямал–Европа» диаметром 1420 мм, протяженностью по территории Беларуси 575 км с пятью компрессорными станциями общей мощностью 752 МВт.

Централизованная заготовка дров и древесных отходов в республике оценивается на уровне 0,94–1,00 млн т у. т. Прогнозируемый годовой объем древесного топлива к 2015 г. может возрасти до 2 млн т у. т.

На 1 января 2000 г. установленная мощность всех энергоисточников Беларуси по производству электрической и тепловой энергии составила 7818,3 тыс. кВт, в т. ч.: КЭС-3300, ТЭЦ-4282.1, блок-станции (передвижные и дизельные) – 199,4, гидроэлектростанции – 6,8. За 1999 г. выработано электроэнергии 26,5 млрд кВт · ч, отпущено тепла 73,1 млн Гкал, количество покупной электроэнергии составило 7,2 млрд кВт · ч. Суммарная установленная мощность всех энергоисточников достаточна для полного самообеспечения республики электроэнергией, однако уже во многих случаях эксплуатация устаревшего оборудования становится невыгодной в сравнении с импортом электроэнергии из соседних государств – России и Литвы, т. к. топливная составляющая себестоимости производства выше стоимости импортируемой электроэнергии.

Потребности республики в энергоносителях в 1999 г. были обеспечены за счет собственных ресурсов на 15,2 % (5,2 млн т у. т.), а остальные 84,8 % – за счет импорта, при этом в общем импорте доля России – 98,4 %, Литвы – 1 %, прочих (Украины, Казахстана, Польши) – 0,6 %.

Основными направлениями развития энергетического сектора экономики Беларуси, смягчающими дефицит собственных первичных энергоресурсов в условиях ограниченности финансовых ресурсов в период становления новых социально-экономических отношений в республике, являются:

- снижение энергоемкости внутреннего валового продукта;
- энергосбережение;
- импорт топливно-энергетических ресурсов для устойчивой работы имеющихся энергоустановок;
- частичное покрытие дефицита электро- и теплоснабжения за счет нетрадиционных источников энергии;
- развитие и модернизация традиционной энергетики на органическом топливе на базе более экономичных высокоэффективных энергетических установок;
- развитие ядерной энергетики.

Эти направления рассмотрены в Энергетической программе Республики Беларусь на период до 2010 г., которая была утверждена в октябре 1992 г.

3. ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ

3.1. Экологические эффекты энергосбережения

Чаще всего любое энергосберегающее решение влечет за собой положительные экологические эффекты. Поэтому при принятии решений о целесообразности затрат на энергосберегающие мероприятия и определении их приоритетов необходимо производить количественную оценку экологических эффектов. Значение энергосбережения для сохранения здоровья и среды обитания человека заключается в некоторых результатах.

1. Первый эффект энергосбережения связан с возможностью не сооружать новые топливные базы, инфраструктуры топливообеспечения, энергопроизводящие источники, сети транспорта и распределения энергоносителей. Производство электрической и тепловой энергии на электростанциях, в котельных оказывает вредное воздействие на окружающую среду, которое характеризуется выбросом в атмосферу вредных веществ, тепловым загрязнением окружающей среды, повышением радиоактивного фона, отчуждением земли под энергообъекты. Доставка энергии потребителям связана с отчуждением значительных территорий, нарушением природных ландшафтов, среды

обитания животных и птиц, электромагнитными излучениями и акустическими шумами от линий электропередачи ультра- и сверхвысокого напряжения. Существует риск нарушений нормального функционирования энергетических объектов и комплексов, возникновения на них чрезвычайных ситуаций и аварий, последствия которых при современных мощностях энергоустановок и интенсивности энергопотоков могут носить глобальный характер.

2. Вторым важным экологическим эффектом энергосбережения является снижение антропогенных выбросов парниковых и загрязняющих газов за счет экономии энергии, внедрения новых энергосберегающих технологий и оборудования в производствах отраслей экономики.

В настоящее время электростанции Беларуси работают на мазуте и природном газе, при сжигании которых в атмосферу поступают газообразные токсичные выбросы окислов серы SO_2 и азота NO_x , а также мелкие твердые частицы золы (порошкообразного негорючего остатка, образующегося при полном окислении горючих элементов, термического разложения и обжига минеральных примесей).

Оксиды серы и азота, соединяясь с атмосферной влагой, образуют слабые растворы кислот и выпадают в виде «кислотных дождей», под воздействием которых происходит закисление почв и увеличение кислотности вод поверхностных водоемов, что наносит ущерб сельскому, рыбному, лесному хозяйствам. Кислотные дожди усиливают коррозию и разрушение строительных материалов и т. д. Это общемировая проблема.

Твердые частицы, содержащиеся в выбросах ТЭС, улавливаются устройствами пылеочистки (скрубберы, фильтры, электрофильтры и т. д.). Эти способы достаточно дороги. Что касается окислов серы и азота, то на сегодня пока не создано эффективных и дешевых очистителей. Для снижения концентраций серы и азота в местах расположения электростанций до предельных значений строятся высокие дымовые трубы (200–300 м) для рассеивания вредных веществ на значительной высоте, которые являются очень дорогими сооружениями. При авариях на ТЭС в реки, озера могут попадать мазут, радиоактивные выбросы, угольная пыль и т. д.

ГЭС также отрицательно воздействуют на окружающую среду. Плотины малых ГЭС Беларуси сооружаются в равнинных местностях, при этом значительные площади земли занимают мелководные водохранилища. Вода в них интенсивно прогревается солнцем, создавая

условия для роста сине-зеленых водорослей, которые гниют, заражая воду и атмосферу. Это отрицательно влияет на судоходство, рыбное хозяйство.

Сооружение АЭС связано с нерешенными проблемами безопасности, с возможным риском катастроф, чреватых глобальными последствиями для огромных территорий, с проблемами захоронения радиоактивных отходов и консервации станции после окончания расчетного срока службы.

Накопление углекислого газа CO_2 , метана и других газов в атмосфере из-за сжигания огромного количества органических топлив (угля, нефти, природного газа) в энергопроизводящих и энергопотребляющих установках – одна из основных причин парникового эффекта. Слой парниковых газов не пропускает солнечное тепло обратно в космос, и средняя температура приземного слоя атмосферы постепенно повышается, что может привести к перераспределению осадков, увеличению числа засух, к затоплению значительных территорий и к глобальным изменениям климата, которые повлекут разрушения сельского, водного, лесного хозяйств, энергетических, транспортных и других производственных систем. Возможно нанесение ущерба здоровью людей. К наиболее загрязняющим в этом отношении отраслям относятся топливно-энергетическая, нефтехимическая, металлургическая и транспортная. Автомобильный транспорт – один из главных источников загрязнения атмосферы углекислым газом. Автомобильными двигателями выделяется в воздух городов более 95 % оксида углерода, около 65 % углеводородов и 30 % оксидов азота. В крупных городах доля загрязнения воздуха автотранспортом достигает 70–80 % от общего уровня загрязнения. Большую опасность для здоровья представляет так называемый фотохимический туман, возникающий в результате сложных фотохимических превращений смеси оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в вещества, значительно более токсичные, чем исходные атмосферные загрязнения. Этот туман с влажностью около 70 % получил название смога.

3. Третьим эффектом энергосбережения является сохранение гидросферы. Беларусь имеет густую речную сеть, десятки тысяч водоемов: озер разной величины, прудов, водохранилищ. Однако водообеспеченность общим стоком на одного жителя в республике составляет $6,4 \text{ км}^3$, что в 3 раза ниже, чем в целом по СНГ. Использование воды на производственные и хозяйственно-бытовые цели неуклонно растет. Основными источниками загрязнения водоемов и водотоков вредными веществами и избытками тепла являются энергоемкие про-

изводства предприятий черной, цветной металлургии, химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, легкой промышленности, бытовые сточные воды. Экономия сжигаемого топлива, энергоносителей приводит к уменьшению загрязнения гидросферы. Большое значение имеет повышение уровня очистки воды на предприятиях, но даже очищенные сточные воды ухудшают качество природных вод. Самостоятельный аспект влияния энергетики на экологическое равновесие естественных водных систем – охрана водоемов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами при их транспортировке и хранении.

Предполагается, что потребление ископаемых видов топлива в мире возрастает. В XXI в. в технически развитых странах потребление энергии возрастет в 6–7 раз, каждый человек будет потреблять 15–20 т у. т. в год. Поэтому необходимо решать проблему компенсации или устранения экологических последствий энергоиспользования.

Основные направления решения этой проблемы:

1. Снижение доли энергоемких технологий во всех отраслях экономики, внедрение энергосберегающих технологий и оборудования.

2. Кроме указанных экологических эффектов более совершенные энергосберегающие технологии обеспечивают качество, конкурентоспособность продукции, лучшие условия труда на производстве, комфортные условия быта населения. Обеспечивая лучший режим энергопотребления во времени, уменьшая риск аварийных ситуаций, переход на новые технологии способствует экологическому равновесию.

3. Безотходное и малоотходное производство, утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Безотходное производство предполагает такую организацию, при которой цикл «первичные сырьевые ресурсы – производство – потребление – вторичные сырьевые ресурсы» построен с рациональным использованием всех компонентов сырья, всех видов энергии и без нарушения экологического равновесия. Безотходное производство может быть создано в рамках предприятия, отрасли, региона, а конечном счете – для всего народного хозяйства. Безотходное производство предполагает кооперирование предприятий с большим количеством отходов (ТЭС, металлургические производства и т. п.) с предприятиями – потребителями этих отходов, например, предприятиями стройиндустрии. Идея безотходного и малоотходного производства означает переход от технологии очищения и разбавления отходов к принципиально новым технологиям оборотного использования (рециркуляции) природных ресурсов, что служит стабилизации и улучшению качества окружающей среды. Практическая реализация этой идеи позволяет добиться, чтобы при-

рост потребностей в топливе, энергии, сырье и материалах на 75–80 % удовлетворялся в результате их экономии, т. е. максимального исключения потерь и нерациональных расходов. Она предусматривает вовлечение в хозяйственный оборот вторичных ресурсов и попутных продуктов. Причем использование ВЭР обеспечивает тройной экологический эффект:

- сохраняются органические энергоресурсы Земли для следующего поколения, которое сможет их использовать по назначениям, где им нет пока альтернативы (химическая продукция, транспорт);

- не нужно строить новые энергетические объекты, которые будут оказывать загрязняющее воздействие;

- очищается биосфера за счет сокращения или отсутствия антропогенного воздействия на нее.

4. Широкое использование возобновляемых источников энергии, спектр и значимость которых для каждой страны и региона определяется местными условиями.

5. Изменение топливного баланса – максимальное применение местных видов топлива. Для нашей республики речь может идти о древесине, прежде всего отходах деревообрабатывающей промышленности, лесозаготовок, санитарных рубок леса, а также о городских отходах. Использование древесины в энергетических целях не влияет на газовый и тепловой баланс Земли. Кроме замещения угля, нефти, газа и устранения вредного влияния продуктов их сжигания на биосферу, применение древесных и городских отходов в качестве топлива решает проблему их утилизации и, следовательно, ликвидации источников загрязнения лесов, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, почв и растений.

6. Поиск новых, альтернативных видов топлива, новых принципов получения, передачи, преобразования энергии, при которых полезный эффект достигался бы при минимальном загрязнении биосферы.

7. Международное нормативно-правовое регулирование пользования природными ресурсами, в том числе энергетическими, и мониторинг энергетического загрязнения биосферы.

3.2. Местные виды топлива

Республика Беларусь относится к странам, геологическая структура которых характеризуется крайне бедными природными топливными ресурсами. Лишь 15–18 % потребностей республики обеспечивается местными запасами топлива, объем и степень освоения которых приведены в табл. 2.

Объем и степень освоения местных видов топлива

Вид топлива	Объем, млн т у. т.	Степень освоения
1. Нефть	2,9–3,0	Извлекаемость из недр – 30 %
2. Попутные газы	0,30–0,55	До 1 %
3. Горючие сланцы	1 млрд т	Отсутствует технология использования
4. Бурые угли	1,2	Отсутствует технология использования
5. Торф	0,15–1,6	Освоено производство
6. Дрова и отходы древесины	5,5–6,0	Совершенствуется технология использования

Запасов природного газа не обнаружено. Нефть Гомельской области, торф юга республики, древесина в общем энергобалансе не превышают 10 % и в основном ориентированы на бытовой сектор. Открыты месторождения бурых углей и сланцев, промышленные запасы которых составляют около 15 годовых потребностей республики, но низкая теплота сгорания и высокая зольность, большое содержание вредных примесей исключают возможность их использования в большой энергетике. Проблематично и применение газификации и гидролиза для повышения качества топлива из этого сырья ввиду высокой энергоемкости этих технологий. Бурые угли в брикетах, особенно с торфом, могут использоваться как коммунально-бытовое топливо, что покрыло бы не более 7 % потребностей на эти цели. Кроме того, добыча бурых углей связана с экологическими проблемами в зоне их залегания – белорусском Полесье: необходимо удаление верхнего слоя почвы и лесов, что нанесет невосполнимый ущерб природе. Торф в основном используется как удобрение для сельскохозяйственных нужд. Основным реальным и экономически целесообразным источником замещения части импортируемого топлива в Беларуси является древесная масса: отходы деревообрабатывающего производства, маломерная и сухостойная древесина, кустарники и т. п. Используя ее в качестве топлива, можно ежегодно экономить до 2,5 млн т у. т. Сегодня доля древесных отходов в потреблении первичных топливных ресурсов республики составляет 2,8 %, в будущем ее можно удвоить.

Использование всех возможных местных топливных ресурсов в Беларуси, согласно экспертным оценкам, в перспективе способно заменить ежегодно 2,1–2,3 млн т нефти.

Древесные отходы как топливо обладают целым рядом положительных качеств:

- низкое содержание серы и малая зольность (1–2 %);
- возможность сжигания отходов с содержанием влаги до 55–60 %;
- меньшая эмиссия двуокиси углерода и низкая коррозионная агрессивность дымовых газов;
- возможность конденсации влаги дымовых газов и утилизации скрытой теплоты парообразования;
- низкая цена в сравнении с ископаемым топливом;
- возможность наращивания объемов ресурсов;
- использование древесных отходов как топлива адаптируется к существующим технологиям энергопроизводства; конечной продукцией их преобразования могут являться теплоносители в виде пара, горячей воды, электроэнергии, моторного топлива.

Таким образом, применение отходов лесозаготовок и деревообрабатывающей промышленности в качестве энергетического топлива – эффективное средство улучшения экологической ситуации и снижения себестоимости производимой энергии.

Имея ввиду распределенность энергетического ресурса древесных отходов по территории республики, организация его использования требует создания единой в технологическом отношении системы с развитой инфраструктурой. Эта система включает следующие обязательные элементы:

- 1) цепь технологий от заготовки топливного сырья до использования его в энергопроизводящих агрегатах;
- 2) эффективные технические средства, в которых осуществляются эти технологии;
- 3) предприятия по заготовке топлива, включая его переработку,
- 4) подсушку, хранение и доставка потребителям;
- 5) развитая сеть потребителей, заинтересованных экономически и экологически в замене традиционных видов топлива (угля, мазута, газа) на древесные отходы;
- 6) комплексы технических средств у потребителей для хранения резерва, подачи и эффективного использования древесного топлива.

Цены на биотопливо на мировом рынке существенно выше, чем на ископаемые виды топлива, что связано с довольно затратным и энергоемким процессом его подготовки до торговой кондиции. Отметим наличие определенных стандартов на качество энергетической продукции. Рыночные цены на древесную щепу превышают цену на уголь при существующих технологиях в 3–3,5 раза. Создание в Бела-

руси системы использования древесных отходов с развитыми инфраструктурами, оснащенной современными техническими средствами, позволит обеспечить, с одной стороны, высокое качество древесного топлива, с другой – потребность в производстве большого тиража технических средств белорусского производства (погрузчики, конвейеры, пневмотранспортные установки, бункеры, рубильные машины, агрегаты для сушки, автоматизированные котлы и т. д.), что повысит рентабельность производства древесного топлива и понизит его себестоимость. И то, и другое будет способствовать конкурентоспособности древесного топлива на внутреннем и мировом рынках.

Потенциальными потребителями топлива из древесных отходов являются:

- деревообрабатывающие предприятия, аккумулирующие и производящие эти отходы и имеющие весьма энергоемкое производство;
- фермы, теплицы, санитарно-оздоровительные комплексы, школы, коттеджи и т. п., размещенные вблизи мест образования древесных отходов;
- частные потребители.

В Беларуси осуществляется программа строительства малых, мини-ТЭЦ и новых котельных на древесных отходах, реконструкции действующих котельных с переводом их на древесное топливо. Объем отходов деревопереработки, лесозаготовок, санитарных рубок леса составляет энергетический потенциал, на базе которого можно производить ежегодно 2–3 млрд кВт · ч электроэнергии и несколько сотен тысяч Гкал энергии. Экономически оправданным является строительство ТЭЦ с мощностью в пределах 10 МВт на базе крупных деревообрабатывающих предприятий с количеством отходов 30–60 тыс. м³ в год, а также на базе лесхозов, средний энергетический потенциал которых составляет 4,5 тыс. т у. т., что обеспечивает электрическую мощность в 3 МВт.

В качестве перспективы рассматривается создание в Беларуси специальных энергетических плантаций на основе быстрорастущих и высокоурожайных растений и древесных кустарниковых пород. Более эффективной по сравнению с традиционным сжиганием в отопительных котлах является утилизация древесных отходов посредством сжигания газообразного топлива, получаемого в результате газогенерации отходов.

Как показал зарубежный опыт энергосбережения, для реализации потенциала местных видов топлива необходимы соответствующая нормативно-правовая база и экономические механизмы создания заинтересованности производителей и потребителей энергетических ресурсов в использовании местного топлива, в том числе:

– предоставление кредитов, займов, налоговых льгот предприятиям и организациям, использующим древесное сырье для получения тепловой и электрической энергии, на покупку перерабатывающего биомассу оборудования;

– штрафные санкции за вывоз древесных отходов на свалку и в отвалы.

3.3. Вторичные энергетические ресурсы

Согласно Закону Республики Беларусь «Об энергосбережении», вторичные энергетические ресурсы – это энергия, получаемая в ходе любого технологического процесса в результате недоиспользования первичной энергии или в виде побочного продукта основного производства и не применяемая в этом технологическом процессе.

Необходимость использования ВЭР объясняется тем, что коэффициент полезного использования (КПИ) энергоресурсов в Республике Беларусь и странах СНГ – главный показатель эффективности производства – не достигает 40 %, что свидетельствует о существовании больших резервов экономии.

Утилизация ВЭР позволяет получить большую экономию топлива и существенно снизить капитальные затраты на создание соответствующих энергосберегающих установок. Разработка методов и способов утилизации ВЭР промышленных предприятий в республиках бывшего Союза началась в 30–40-х гг. XX в., т. е. когда были заложены теоретические основы энергосбережения и предложены первые технические решения. Наиболее значительные достижения в практике утилизации тепловых отводов народного хозяйства приходятся на послевоенные годы (конец 40-х – начало 50-х гг.).

К середине 50-х гг. в транспортном и тяжелом машиностроении уровень использования ВЭР достигал уже 10–15 %. В цветной металлургии в этот период использовалось 10–25 % теплоты уходящих газов, но только до 2 % – теплоты производственных отходов и шлака и до 1 % – охлаждающей воды. В черной металлургии из возможных ВЭР в объеме до 1,5 млн т у. т. использовалось не более 300 тыс. т, т. е. около 20 %. Почти отсутствовала утилизация теплоты уходящих газов и других видов ВЭР в химической, стекольной и нефтеперерабатывающей отраслях промышленности. Практически не утилизировалась низкопотенциальная теплота. В 60–70-е гг. наблюдались быстрый рост общего уровня энергопотребления и усиление внимания к сбережению энергоресурсов. В 1965 г. по стране было реализовано около 117 млн ГДж, а в 1975 г. – до 625 млн ГДж ВЭР.

С 70-х – начала 80-х гг. интерес к использованию ВЭР неуклонно возрастает, поскольку возможности экономии энергоресурсов за счет снижения удельных расходов энергии на выпуск конечного продукта на современном этапе развития в значительной степени исчерпаны. В то же время по некоторым видам продукции удельная энергоёмкость все еще существенно превышает достигнутый за рубежом уровень. В настоящее время одна из важнейших задач народного хозяйства Беларуси – всемерное использование вторичных энергоресурсов. Решение этой задачи предусмотрено государственной научно-технической программой «Энергосбережение».

Известно, что на каждом этапе технического развития существуют экономические пределы повышения КПД энергоиспользования, однако даже с их учетом резервы повышения КПИ, соответствующего современному уровню развития науки и техники, достаточно велики. Таким образом, для бережного, экономного расходования энергии требуются радикальные меры, которые в ближайшие годы обеспечили бы сведение потерь до 10–15 %, расходуемого в народном хозяйстве Беларуси топлива. Известно, что тепловые электростанции расходуют примерно 25 % добываемого топлива, средний коэффициент его использования не превышает 40 %, т. е. почти 2/3 энергии сжигаемого топлива уносится с теплыми сбросными водами. Только в энергетике стран СНГ бесполезно теряется за год около 250 млн т у. т.

3.3.1. Основные показатели использования ВЭР

Применительно к ВЭР вводятся следующие термины и понятия:

Общие энергетические отходы – это энергетический потенциал всех материальных потоков на выходе из технологического агрегата (установки, аппарата) и все потери энергии в агрегате.

Общие энергетические отходы подразделяют на три потока:

1) неизбежные потери энергии в технологическом агрегате (установке);

2) энергетические отходы внутреннего использования – энергетические отходы, которые возвращаются обратно в технологический агрегат (установку) за счет регенерации или рециркуляции;

3) энергетические отходы внешнего использования – энергетические отходы, представляющие собой вторичные энергетические ресурсы.

Выход ВЭР – масса вторичных энергоресурсов, которые образовались в данной установке за определенный период времени (час, сутки, месяц, квартал, год) и пригодны к использованию в этот период.

Использование ВЭР – это масса вторичных энергоресурсов какого-либо агрегата, употребленных в других установках и системах. ВЭР могут быть утилизированы без изменения вида энергоносителя или путем преобразования их в другие виды энергии для выработки теплоты, холода и механической работы, полученной в утилизационной установке.

Выработка за счет ВЭР – количество теплоты, холода и механической работы, полученной в утилизационной установке.

Различают четыре вида выработки: *возможную*, т. е. максимальное количество энергии, которое можно получить при работе установки; *экономически целесообразную*, т. е. выработку с учетом экономических факторов (себестоимости, затрат труда и т. д.); *планируемую* – количество энергии, которое предполагается получить за определенный период времени при вводе утилизационных установок или модернизации имеющихся, и *фактическую* – количество энергии, реально полученное за определенный период.

Коэффициент использования выработки энергии за счет ВЭР – отношение фактического (планируемого) использования энергии, полученной за счет ВЭР, к фактической (планируемой) выработке.

Резерв утилизации ВЭР – количество энергии, которое может быть дополнительно вовлечено в производство.

Возможная экономия топлива за счет ВЭР – количество теплоты, которое было бы сэкономлено при полном использовании всего выхода ВЭР.

Коэффициент утилизации ВЭР – отношение фактической (планируемой) экономии топлива за счет ВЭР к возможной. Его определяют для одного агрегата-источника ВЭР, группы агрегатов, предприятия, отрасли по каждому виду ВЭР и суммарно для всех видов ВЭР.

Для характеристики состояния использования ВЭР, пригодных для непосредственного использования без преобразования энергоносителей, применяют следующие показатели: выход ВЭР; фактическое использование ВЭР; резерв утилизации; экономия топлива за счет ВЭР (возможная, фактическая); коэффициент утилизации ВЭР.

3.3.2. Классификация ВЭР

Различают ВЭР: горючие, тепловые и избыточного давления (табл. 3).

Горючие ВЭР – это горючие газы и отходы одного производства, которые могут быть применены непосредственно в виде топлива в других производствах. Это: доменный газ – металлургия; щепа,

опилки, стружка – деревообрабатывающая промышленность; твердые, жидкие промышленные отходы – химическая и нефтегазоперерабатывающая промышленность и т. д.

ВЭР избыточного давления – это потенциальная энергия покидающих установку газов, воды, пара с повышенным давлением, которая может быть еще использована перед выбросом в атмосферу. Основное направление таких ВЭР – получение электрической или механической энергии.

Тепловые ВЭР – это физическая теплота отходящих газов, основной и побочной продукции производства; теплота золы и шлаков; теплота горячей воды и пара, отработанных в технологических установках; теплота рабочих тел систем охлаждения технологических установок. Тепловые ВЭР могут использоваться как непосредственно в виде теплоты, так и для отдельной или комбинированной выработки теплоты, холода, электроэнергии в утилизационных установках.

Температура отходящих газов различных промышленных печей и нагревательных устройств колеблется от 800–900 °С (в печах с регенераторами) до 900–1200 °С в термических, прокатных и кузнечных (без регенерации), что позволяет в котлах-утилизаторах вырабатывать пар высоких параметров для технологических и энергетических нужд. Кроме того, поскольку нагревательные печи, как правило, оборудованы системой охлаждения отдельных элементов конструкции, при испарительном охлаждении можно получить пар давлением до 4,5 МПа, который используется и в энергетических целях. Так как температура уходящих газов после котлов-утилизаторов все еще достаточно высока (около 200–250 °С), их теплоту целесообразно применять для коммунально-бытовых нужд или отопления (нагрева воды).

Таблица 3

Классификация ВЭР по видам и направлениям их использования

Вид ВЭР	Носители ВЭР	Энергетический потенциал	Направление и использование способов утилизации
Горючие	Твердые, жидкие, газообразные отходы	Низшая теплота сгорания	<i>Топливное</i> Сжигание в топливоиспользующих установках
Тепловые	Отходящие газы, охлаждающая вода, отходы производств, промежуточные продукты, готовая продукция	Энтальпия	<i>Тепловое</i> Выработка в теплоутилизационных установках водяного пара, горячей воды, использование для покрытия потребности в тепле

Вид ВЭР	Носители ВЭР	Энергетический потенциал	Направление и использование способов утилизации
Тепловые	Отработанный и попутный пар	Энтальпия	<i>Тепловое и комбинированное</i> Покрытие теплопотребности, выработка электроэнергии в конденсационном или теплофикационном турбоагрегате
ВЭР избыточного давления	Газы с избыточным давлением	Работа изотропного расширения	<i>Электроэнергетическое</i> Выработка электроэнергии в газовом утилизационном турбоагрегате

На машиностроительных предприятиях тепловые ВЭР сравнительно высоких параметров образуются в основном в мартеновских, нагревательных и термических печах в виде теплоты уходящих газов и теплоты охлаждения установок, печей, продукции. Кроме того, низкопотенциальная теплота содержится в отработанном паре, образующемся в процессе работы прессов и молотов.

Доменные газы, имеющие теплоту сгорания около 4000 кДж/м^3 , относятся к горючим ВЭР, но поскольку они обладают давлением выше атмосферного (до 0,3 МПа), то могут быть использованы как ВЭР с избыточным давлением в газовой бескомпрессорной утилизационной турбине для выработки дополнительной электроэнергии или привода воздухоудовок. При водяном охлаждении доменных печей и металлоконструкций можно получить значительное количество низкопотенциальной теплоты (с температурой 15–20 °С). Метод испарительного охлаждения при сокращении расхода воды и электроэнергии на ее перекачку позволяет выработать пар высокого давления (до 0,8 МПа), используемый для нужд теплоснабжения.

Температура уходящих газов воздухонагревателей доменных печей колеблется в пределах 150–600 °С, температура уходящих газов кауперов достигает 250–500 °С. Их теплота может быть использована для выработки пара, горячей воды или для подогрева доменного газа перед входом в утилизационную трубу.

Перспективно использование теплоты шлаков, которые в цветной металлургии выходят с температурой до 1300 °С и уносят до 15–70 % общей теплоты. В черной металлургии значительные отходы теплоты образуются в агломератном и ферросплавном производствах (средняя температура шлаков колеблется в пределах 500–550 °С).

На предприятиях машиностроения в настоящее время тепловыми отходами являются физическая теплота уходящих газов, теплота охлаждения нагревательных и термических печей и вагранок, теплота отработанного пара кузнечно-прессового оборудования.

В промышленности строительных материалов тепловые ВЭР образуются при обжиге цементного клинкера и керамических изделий, производстве стекла, кирпича, извести, огнеупоров, выплавке теплоизоляционных материалов. К ним относятся физическая теплота уходящих газов различных печей (туннельных, шахтных, вращающихся) и т. д.

Крупными потребителями пара различных параметров, электроэнергии, горячей и теплой воды, а также холода являются почти все отрасли пищевой промышленности, поэтому и тепловые ВЭР предприятий пищевой промышленности также весьма разнообразны. Это прежде всего теплота отходящих горячих газов и жидкостей; жидких и твердых отходов производства; отработанного пара силовых установок и вторичного пара, который получается при выпаривании растворов, ректификации и высушивании; тепловых установок; теплота, содержащаяся в продуктах производства.

Вторичные энергоресурсы имеются также на тепло- и гидроэлектростанциях. На гидроэлектростанциях отходы теплоты образуются в результате тепловыделения в электрогенераторах. Для тепловых электростанций наиболее существенный источник ВЭР – низкопотенциальная теплота нагретой охлаждающей воды конденсационных устройств, с которой может теряться до 50 % теплоты топлива, расходуемого на электростанции. Источником ВЭР считаются также дымовые газы котельных установок на паротурбинных станциях или отходящие продукты сгорания газотурбинных установок.

Для охлаждающих установок источником тепловых ВЭР может служить нагретая охлаждающая вода из воздухоохладителей и регенеративных тепло-обменных аппаратов.

Источником ВЭР может быть нагретая охлаждающая вода из системы охлаждения генераторов электростанций. Значительные тепловые отходы имеются и на АЭС: теплота конденсата, теплота охлаждающих систем и др. Таким образом, основными источниками образования ВЭР в различных отраслях промышленности выступают технологические аппараты, как правило, недостаточно совершенные с энергетической точки зрения, поскольку современная технология допускает работу установок с низким КПД.

4. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

4.1. Краткая характеристика состояния вопроса

Топливо и энергоресурсы в литейном производстве используются на технологические нужды (плавка и доводка металлов и сплавов, термообработка отливок, сушка, отверждение стержней, сушка формовочных материалов, подогрев шихтовых материалов), и общепроизводственные потребности (приводы оборудования и его эксплуатация, питание управляющих систем, освещение, отопление, вентиляция помещений и т. п.).

Стоимость энергоносителей (табл. 4) приблизилась к мировым ценам и в общей структуре текущих затрат в литейном переделе имеет определяющее значение для экономики производственной деятельности. По данным литейных предприятий почти 70 % затрат на производство отливок составляют материалы и энергоносители, причем доля энергоносителей достигает 35–37 %, при этом удельный расход энергоресурсов на тонну производимых отливок в Республике Беларусь остается более высоким, чем в ряде промышленно развитых стран. Что объясняется рядом факторов:

- использованием устаревшего технологического оборудования;
- применением энергоемких материалов и технологий для производства отливок;
- недостаточной заинтересованностью персонала литейных производств в снижении энергозатрат и др.

Сегодня, в условиях резкого падения объемов производства отливок и увеличения доли энергозатрат в себестоимости тонны литья, снижение затрат на энергию приобретает особое значение. Однако, рассматривая мероприятия по энергосбережению, следует главное внимание уделять вопросам технологичности каждого мероприятия, возможностям обеспечения качества продукции. Снижение качества отливок, увеличение количества брака приведут к увеличению расхода энергоносителей и возможно перекроют ожидаемую экономию от внедрения предлагаемого мероприятия.

Все технологические переделы при производстве отливок из черных и цветных сплавов имеют резервы для снижения энергозатрат, но использовать надо только те из них, которые улучшат качество продукции или хотя бы не ухудшат.

Таблица 4

Основные виды энергоносителей, применяемых в литейном производстве на технологические нужды

Наименование энергоносителя	Принятая для расчетов теплотворная способность, Q_n^p	Ориентировочная цена на 1 кв. 2001 г., руб. (без НДС)
Литейный кокс	6750 ккал/кг	2710 руб./т
Доменный кокс	6600 ккал/кг	2600 руб./т
Графитированные электроды (бой)	7800 ккал/кг	12 000 руб./т
Мазут	8700 ккал/кг	3200 руб./т
Природный газ	8500 ккал/м ³	502 руб./1000 м ³
Электроэнергия	860 ккал/кВт · ч	0,6 руб./ кВт · ч

4.2. Характеристика процессов плавки чугуна, критерии выбора плавильных агрегатов

При плавке чугуна в качестве основных энергоносителей, как правило, используются электроэнергия (дуговые, индукционные печи), природный газ и жидкое топливо (в газовых вагранках и пламенных печах) и литейный кокс (в коксовых вагранках). Эффективность использования топлива представлена в табл. 5.

Таблица 5

Эффективность использования топлива, энергии на выплавку 1 т чугуна в различных плавильных агрегатах

Теоретическая потребность энергии на нагрев, плавление и перегрев до 1450 °С 1 т чугуна, ккал/т	Практический расход энергоносителей на плавку				
	Плавильный агрегат	Энергоноситель	Удельный расход на 1 т жидкого расплава	Стоимость энергоносителя на 1 т расплава, рос. руб.	Эффективность использования энергии, %
342500 (398,2 кВт · ч/т)	Вагранка газовая фирмы DUKER	Природный газ + электроэнергия + карбюратор	54,47 м ³ /т (538,4 кВт · ч/т) + + 59 кВт · ч/т + + 8,8 кг/т (74,4 кВт · ч/т)	27,34 + 35,4 + + 44,7 = 107,4	59,2

Теоретическая потребность энергии на нагрев, плавление и перегрев до 1450 °С 1 т чугуна, ккал/т	Практический расход энергоносителей на плавку				
	Плавильный агрегат	Энергоноситель	Удельный расход на 1 т жидкого расплава	Стоимость энергоносителя на 1 т расплава, рос. руб.	Эффективность использования энергии, %
342500 (398,2 кВт · ч /т)	Вагранка газовая с электродным боем	Природный газ + бой электродов	65 м ³ /т (645,4 кВт · ч/т) + + 25 кг (227 кВт · ч /т)	32,6 + 300 = = 332,6	45,6
	Вагранка коксовая	Кокс	150 кг/т (1170 к кВт · ч /т)	406,5	34,0
342500 (398,2 кВт · ч /т)	Вагранки с подогревом дутья 450 °С	Кокс лит. + природный газ	106,0 кг/т (832 кВт · ч /т) + + 20 м ³ /т (194 кВт · ч /т)	287,3 + 11,0 = = 298,3	39,0
	Дуплекс-процесс вагранка с х.д. + индукцион. миксер	Кокс домен. + электроэнергия	121 кг/т (928 кВт · ч /т) + + 123 кВт · ч /т	328 + 73,8 = = 401,8	37,9
	ИЧТ-6	Э/энергия	1100 кВт · ч /т	660,0	36,2
	IFM-5 ср. част.	—/—	550 кВт · ч /т	330	72,4
	ДЧМ-5	—/—	680 кВт · ч /т	408	50,2
	ДППТ-6	—/—	600 кВт · ч /т	360 руб./т	66,4

Из приведенных данных видно, что наиболее эффективно расходуется тепловая энергия при плавке чугуна в электрических индукционных тигельных печах средней частоты, дуговых постоянного тока и газовой вагранке фирмы DUKER, Германия. Эти печи имеют более высокий термический КПД. Индукционные печи промышленной частоты требуют постоянный расход электроэнергии для поддержания «болота» металла в расплавленном состоянии между завалками и в периоды горячих простоев печи.

Однако более экономичными по затратам на энергоносители для расплавления и перегрева чугуна являются процессы плавки чугуна:

- в газовой вагранке фирмы DUKER – 107,4 рос. руб./т (с учетом расходуемых керамических шаров 11 кг/т по цене 3,1 рос. руб. за кг – 141,5 рос. руб./т);

- в вагранке с подогревом дутья с использованием тепла колошниковых газов и природного газа – 298,3 рос. руб./т;

- в газовой вагранке конструкции завода «Пензкомпрессормаш» с холостой колошей с использованием боя графитированных электродов – 3327667 т; индукционной тигельной печи средней частоты – 330 руб./т;

- в дуговой печи постоянного тока – 360 руб./т.

Эта «экономичность» определяется текущими ценами на энергоноситель и не учитывает многие качественные стороны плавильных процессов.

К основным критериям, по которым следует выбирать тот или иной плавильный агрегат для чугунолитейного производства, можно отнести следующие:

- технологические возможности плавильного агрегата для обеспечения технических требований к производимым отливкам;

- технические показатели плавильного агрегата для обеспечения проектируемых объемов выпуска отливок и соответствующей организации производственного процесса;

- минимальность затрат для защиты окружающей среды от вредных воздействий при эксплуатации плавильного агрегата;

- экономичность процесса плавки чугуна.

Критерий «технологические возможности...» включает в себя такие показатели, как возможность:

- получения нужных марок чугуна;

- плавки исходного чугуна для последующего сфероидизирующего модифицирования с целью получения заданных марок высокопрочного чугуна с шаровидной (вермикулярной) формой графита;

- щадящего режима плавки чугуна с перемешиванием расплава и последующим высоким перегревом для разрушения наследственных пороков металлической шихты;

- быстрого перехода плавки с одной марки чугуна на другую (мобильность процесса);

– миксерования расплава чугуна в плавильной печи в период его разливки с поддержанием стабильной температуры.

Критерий «технические показатели...» включает:

- производительность плавильного агрегата;
- режим работы плавильного агрегата;
- установленную мощность потребляемой электроэнергии;
- грузоподъемность обслуживающих плавильный агрегат средств;
- потребную площадь и высоту здания для установки и эксплуатации плавильного агрегата.

Критерий «минимальность затрат для защиты окружающей среды...» учитывает объемы выделений вредных веществ при эксплуатации плавильного агрегата и необходимые средства для их улавливания и нейтрализации вредного воздействия на окружающую среду.

Критерий «экономичность процесса плавки...» включает следующие показатели:

- энергоноситель, удельный расход на одну тонну выплавляемого чугуна;
- тепловой КПД плавильного агрегата;
- возможность проведения металлургической обработки расплава для получения качественного чугуна при использовании низкосортной шихты;
- металлургический угар металла и компонентов сплава.

Критерий «контролируемость и культура плавки...» определяется:

- возможностью инструментального контроля процесса плавки;
- компьютеризацией управления процессом плавки.

Основные показатели к критериям оценки плавильных агрегатов приведены в табл. 6.

**Показатели оценки эффективности плавильных агрегатов
для плавки чугуна (вагранки)**

Показатели оценки	Вагранка с х. д., водоохлаждаемая, с дожиганием СО и мокрой пылеочисткой газов	Вагранка закрытая с рекуператором для подогрева дутья до 500 °С типа GHW	Вагранка газовая с холостой колошей из боя гр. электродов, с подогревом дутья до 250 °С, водоохлаждаемая	Вагранка газовая типа DUKER с водоохлаждаемой решеткой, огнеупорными шарами-наполнителями, с индукционным канальным копильником
1. Нормальный режим работы	Непрерывный процесс плавки			
2. Энергоноситель, для плавки	Кокс литейный	Кокс литейный + природный газ	Природный газ + электродный бой	Природный газ + электроэнергия
3. Температура перегрева расплава, °С	1400	1520	1410 (до 1530)	1420 (до 1520)
4. Шихтовые материалы, чушк. чугун, % от м/з стальной лом	40–45	До 20	До 10	До 18
	12–15	32–58	40–60	20–40
5. Качество металлошихты	Качественная	Рядовая д/вагранки	Рядовая д/вагранки	Рядовая д/вагранки
6. Metallургический угар чугуна, % (угар (-), пригар (+))	2–2,5	Около 2,0	До 2,5	
	C (+) 10–50	(+) 20–30	(-) 9–12	
	Si (-) 10–25	(-) 10–20	(-) 10–12	
	Mn (-) 10–30	(-) 10–20	(-) 15–20	
	S (+) 40–100	(+) 10–50	0	
7. Min % S в чугуне	0,12	0,10	0,05	0,05
8. Metallург-процесс ведения плавки	Возможен ограниченно	Возможен ограниченно	Возможен ограниченно	Возможен ограниченно

Окончание табл. 6

Показатели оценки	Вагранка с х. д., водоохлаждаемая, с дожиганием СО и мокрой пылеочисткой газов	Вагранка закрытая с рекуператором для подогрева дутья до 500 °С типа GHW	Вагранка газовая с холостой колошей из боя гр. электродов, с подогревом дутья до 250 °С, водоохлаждаемая	Вагранка газовая типа DUKER с водоохлаждаемой решеткой, огнеупорными шарами-наполнителями, с индукционным каналным копильником
9. Загрязнение среды: – тв. отходы (шлак и др), кг/т – газвыбросы, мг/м ³ : СО SO ₂ NO _x Пыль	80–100 до 20 до 16 более 1,0 ~35	60–70 0,05 до 8 более 0,5 0,08	до 50 2,0 До 8 около 0,5 до 25	40–50 2,0 до 8 менее 0,5 до 25
10. Высота пролета, м	11–13			
11 .Требуется производственная площадь, м ²	~432			

Таблица 7

Показатели оценки эффективности плавильных агрегатов для плавки чугуна (электропечи)

Наименование показателей оценки, ед. измерения	Электродуговые печи переменного тока типа ДЧМ	Электродуговые печи постоянного тока типа ДПТ	Индукционные тигельные электропечи промышленной частоты типа ИЧТ	Индукционные, тигельные электропечи средней частоты типа ИФМ ф. АВВ
1. Нормальный режим работы	Поплавочный		Поплавочный с «болотом»	Поплавочный
2. Энергоноситель плавки	Электроэнергия			

Наименование показателей оценки, ед. измерения	Электродуговые печи переменного тока типа ДЧМ	Электродуговые печи постоянного тока типа ДПТ	Индукционные тигельные электропечи промышленной частоты типа ИЧТ	Индукционные, тигельные электропечи средней частоты типа IFM ф. АВВ
3. Уд. расход энергоносителя на 1 т выплавляемого чугуна: – физ. единицы – теплоэнергия	650–750 кВт · ч 559–645 Мкал	550–650 кВт · ч 473– 59Мкал	> 1100 > 946 Мкал	550 кВт · ч 473 Мкал
4. Температура перегрева расплава чугуна, °С	до 1500	до 1500	до 1450	до 1450
5. Шихтовые материалы: – чушковой чугуна, % от м/з – стальной лом	5–8 25–35	5–8 до 60	8–12 30–40	8–12 до 60
6. Качество шихты для плавки	Возможно применение низкосортного стального и чугунонного лома		Очищенный от пригара, сухой	Очищенный от пригара
7. Metallurgical угар чугуна, % угар (–), пригар(+) С Si Mn S	(–) 3,5–5,0 (+) 5–10 (–) 5–15 (осн. печь) (–) 15–30 (–) 20–30 (осн. печь)	(–) ~ 3,0 (–) < 5,0 0 (–) 10–20 0	(–) ~ 3,0 (–) 5–15 (–) 15–20 (осн. печь) (–) 10–15 0	(–) ~ 2,0 (–) 15–20 (–) 0–15 (–) 5–15 0
8. Min % S в расплаве	Содержание в шихте. Возможен процесс десульфурации		Содержание в шихте	
9. Metallurgical обработка расплава	Возможна		Не возможна	

Наименование показателей оценки, ед. измерения	Электродуговые печи переменного тока типа ДЧМ	Электродуговые печи постоянного тока типа ДПТ	Индукционные тигельные электропечи промышленной частоты типа ИЧТ	Индукционные, тигельные электропечи средней частоты типа IFM ф. АВВ
10. Загрязнение среды: а) твердые отходы (шлак), кг/т расплава б) газовые выбросы, мг/м ³ СО SO ₂ NO _x в) пылевые, кг/т расплава	60–80 0,88–0,94 – 0,18–0,20 5,6–6,0	40–70 до 0,8 – до 0,2 менее 5,0	20–30 0,5–0,07 – 0,37 0,55–0,8	20–30 0,5–0,07 – 0,37 0,55–0,8
11. Высота пролета до подкрановых путей, м	13 – д/ печей 6 т 18 – д/печей 12 т		9,65 – д/тигля емк. 6 т 11,5 – д/тигля емк. 10 т	
12. Производственная площадь для установки 2-х печей, м ²	324 – д/ печей 6 т 860 – д/печей 12 т		96 – д/тигля емк. 6 т 144 – д/тигля емк. 10 т	

4.3. Рекомендации к выбору плавильных агрегатов чугунолитейного производства

Выбор плавильного агрегата всегда надо начинать с его технологических возможностей стабильно получать качественный металл заданного состава и структуры с требуемыми физико-механическими и литейными свойствами, определяющими качественный уровень выпускаемой предприятием продукции.

Плавильный агрегат должен обеспечивать с минимальными затратами на защитные устройства наилучшее экологическое состояние окружающей среды, быть экономичным в эксплуатации, иметь минимальные затраты на энергоноситель, используемую металлошихту и футеровочные материалы.

Анализ показателей критериев эффективности плавильных агрегатов и тенденции в развитии литейного производства в мире свидетельствует о приоритетном применении электроплавки чугуна.

В современных литейных цехах США и Европы при крупносерийном производстве чугунных отливок (преимущественно для автомобилестроения) применяются для расплавления электродуговые печи с емкостью ванны до 50 т и для перегрева и выдержки чугуна мощные индукционные канальные миксеры до 100 т. Такая комбинация оправдывается не только необходимостью непрерывной заливки автоматических литейных линий жидким металлом со стабильными литейными параметрами, но и экономически. Известно, что тепловой КПД электродуговой печи в период расплавления шихты имеет высокие показатели (80–85 %), а при перегреве значительно снижается (до 20 %). Индукционные канальные печи и миксеры при перегреве и выдержке металла имеют КПД 75–80 %. Кроме экономии на энергии такой дуговой процесс позволяет использовать для плавки чугуна более дешевую шихту и получать металл высокого качества.

В небольших по мощности литейных производствах с большой, часто сменяющейся номенклатурой отливок из разных марок чугуна чаще используются индукционные плавильные установки с двумя тигельными печами средней частоты и специальными регуляторами распределения мощности печей (TWIN-POWER, DUOMELT, VIP DUAL TRAK), позволяющими печам работать попеременно в режиме плавки чугуна и его миксирования в период разлива. Тепловой КПД таких плавильных установок составляет ~ 65 %.

В отечественной литейной практике в последние годы получают распространение газовые вагранки, работающие с огнеупорно-графитовой холостой колошей. Вагранки работают на более дешевом, чем литейный кокс, природном газе. Достигают высокой температуры перегрева расплава; что позволяет использовать в шихте больше стального лома. Значительно менее загрязняют окружающую среду (меньше шлака и вредных газов). При определенных условиях ведения плавки позволяют получать исходный расплав чугуна для последующего модифицирования с целью получения шаровидного графита и высокой прочности.

Дуговые печи постоянного тока (ДППТ) потребляют меньше электроэнергии на плавку чугуна, чем дуговые печи переменного тока. Процесс плавки проходит под влиянием более мягкой электродуги, значительно меньше угар металла и химических элементов, меньше выделений вредных газов, меньше шум. ДППТ меньше расходуют

графитированных электродов и не создают в электросети явлений фликера при расплавлении шихты. Позволяют вести плавку с металлургическим процессом при работе на второсортной металлошихте. Существующие в литейных цехах электродуговые печи переменного тока реконструируются в печи ДППТ.

Таким образом, при выборе плавильных агрегатов для реконструкции существующих чугунолитейных производств или создании новых, которые отвечали бы требованиям для сертификации качества производства в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9002, следует руководствоваться приведенными в ИТМ критериями, показателями и характеристиками современных процессов и оборудования для плавки.

4.4. Некоторые аспекты эффективности интенсификации процесса плавки чугуна в вагранках

В настоящее время большая часть чугуна выплавляется в коксовых вагранках. Для интенсификации процесса плавки применяются подогрев дутья и обогащение его кислородом.

Сравнение различных методов улучшения работы вагранок позволяет сделать вывод о более высокой технико-экономической эффективности подогрева дутья при использовании тепла химических реакций от сжигания колошникового газа и природного газа.

Подогрев ваграночного дутья возможен или при использовании тепла от внешнего источника, или за счет применения физического и химического тепла отходящих колошниковых газов вагранки. При сравнении затрат и экономической эффективности вышеуказанных способов подогрева ваграночного дутья способ подогрева дутья за счет сжигания природного газа более эффективен по сравнению со способом использования отходящих ваграночных газов. Использование природного газа позволяет получать более высокую температуру подогрева дутья, причем остановки вагранки не влияют на температуру подогрева, а конструкция рекуператора проще.

Применение кислорода в ваграночной плавке содействует увеличению производительности вагранки, улучшению качества металла и снижению брака литья. Наиболее распространены два метода подачи кислорода в вагранку: общее обогащение воздуха и подача кислорода отдельными соплами в фурмы (кислородный поддув).

При сравнительно одинаковых достоинствах этих методов метод обогащения дутья кислородом требует меньшего расхода кислорода.

Сравнительные расчеты использования кислорода и подогрева дутья для интенсификации ваграночной плавки на примере вагранок производительностью 5 и 10 т/час показали, что применение горячего дутья требует больших капитальных вложений примерно на 55 %, а в случае использования кислорода уменьшается себестоимость по изменяющимся элементам затрат примерно на 15 % (по данным на 1999 г.).

Использование кислорода в ваграночной плавке может оказаться экономически целесообразным в тех производствах, где требуется особо высокий перегрев металла, например для получения тонкостенного литья. В этом случае на величину эксплуатационных расходов существенное влияние может оказать экономия от уменьшения брака отливок и значительного снижения % CO в отходящих газах.

Эффективным мероприятием по совершенствованию ваграночной плавки и повышению экономичности является снижение расхода или замена литейного кокса.

В последние годы в нашей стране и за рубежом проводятся работы по замене кокса другими более дешевыми и менее дефицитными видами топлива. Определенный экономический эффект достигается за счет частичной замены кокса природным газом, который в настоящее время является наиболее дешевым видом топлива, применяемым в литейном производстве (табл. 8).

Таблица 8

Экономическая эффективность использования природного газа для подогрева дутья по сравнению с коксогазовой вагранкой видна на примере вагранок производительностью 5 и 10 т/час

Наименование показателей	Производительность вагранок			
	5 т/час		10 т/час	
	Коксогазовая	С подогревом дутья	Коксогазовая	С подогревом дутья
Выпуск жидкого чугуна, тыс. т в год	20,75	20,75	41,5	41,5
Примерное соотношение затрат на дополнительное оборудование	1,0	1,7	1,0	1,8
Изменение себестоимости 1 т выплавленного чугуна	1,2	1,0	1,22	1,0

Себестоимость чугуна при использовании природного газа для подогрева дутья в вагранках ниже по сравнению с коксогозовыми вагранками. Снижение себестоимости жидкого чугуна в вагранках с подогревом дутья достигается уменьшением потребления кокса. При использовании природного газа для подогрева дутья кроме снижения расхода кокса можно также удешевить металлошихту за счет применения более дешевых шихтовых материалов. По Г. П. Долотову эффективность использования природного газа для подогрева дутья выше. Сжигание 1 м^3 природного газа уменьшает расход кокса в рабочей колоше в коксогозовых вагранках на 1 кг, а в вагранках с подогревом дутья – на 3 кг.

При переоборудовании коксовой вагранки на вагранку с подогревом дутья следует учитывать, что на изготовление воздухоподогревателя потребуются серьезные затраты из-за требующейся жароупорной стали. Кроме того, для установки воздухоподогревателя, обеспечивающего подогрев дутья до $400\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$, нужна значительная производственная площадь.

В некоторых случаях применяется одновременно газ и подогрев дутья. Подогрев дутья производится в обогреваемом сжиганием колошниковых газов воздухоподогревателе или в рекуператоре, установленном в трубе вагранки. Коксогозовые вагранки оборудуются системой подогрева дутья. В коксогозовых вагранках с подогревом дутья расход кокса снижается до $7\text{--}8 \%$ вместо $15\text{--}16 \%$, при этом общий расход природного газа для частичной замены кокса и подогрева дутья составляет $37\text{--}40 \text{ м}$ на тонну жидкого металла.

Общая годовая экономия при комбинированном способе использования природного газа по сравнению с использованием его для подогрева дутья коксовых вагранок незначительна, а требуемые капитальные вложения большие. Усложняется эксплуатация вагранки, увеличиваются ремонтные работы. При этом следует учитывать, что методы частичной замены кокса природным газом не решают проблемы выброса в атмосферу пыли и окиси углерода.

При плавке чугуна в газовых вагранках значительно снижаются затраты на технологическое топливо за счет полной замены кокса природным газом. Плавка чугуна в газовых вагранках внедрена в литейном производстве ОАО «Пензкомпрессормаш», Гомельском ремонтно-механическом, Чусовском металлургическом и других заводах. Однако затраты на футеровку газовых вагранок в $1,75$ раза выше, чем коксовых. Себестоимость тонны жидкого чугуна марки СЧ 20,

полученного в газовой вагранке, почти на 18 % ниже, чем в коксовой.

При выборе рационального способа применения природного газа для плавки чугуна следует исходить из конкретных условий производства. В строящихся и проектируемых литейных цехах, в районах, богатых природным газом, целесообразно устанавливать газовые вагранки или применять дуплекс-процесс газовой вагранки – электромиксер. В действующих литейных цехах, располагающих площадями для установки воздухоподогревателей, целесообразно использовать природный газ для подогрева дутья. В тех литейных цехах, где по условиям производства не требуется высокого перегрева металла или необходимо увеличить выпуск жидкого чугуна, рационально коксовые вагранки переоборудовать на коксогазовые. В этом случае они требуют меньших капитальных затрат и могут работать как в коксогазовом, так и в коксовом варианте.

Кроме экономической эффективности использования природного газа в вагранках, существует народно-хозяйственная эффективность замены кокса при плавке чугуна в вагранках природным газом. Так, при замене лишь 50 % литейного кокса природным газом потребность в коксе уменьшается по стране на 1,5 млн т, что обеспечит экономию около 2 млн т дефицитных коксующихся углей. При этом средние удельные капиталовложения на 1 т у. т. в угольные шахты, поставщики коксующихся углей, и коксохимическое производство в 6–7 раз меньше, чем в газодобывающие промыслы.

Оценивая экономическую эффективность дуплекс-процесса, нужно помнить, что это два самостоятельных агрегата. Представляется интересным и экономически выгодным сочетание двух агрегатов в одном, так называемый электрогазовый процесс: газовая вагранка с индукционным копильником (газовая вагранка конструкции фирмы DUKER). В табл. 9 приведены данные по сравнению потребляемой энергии вагранок.

Примечание. Коэффициент пересчета $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$, температура плавления $1525 \text{ }^\circ\text{C}$, производительность плавки 100 т/ смену.

Значения теплоты сгорания: кокс – 33,49 МДж/кг (9,3 кВт · ч); мазут – 37,68 МДж/кг (10,47 кВт · ч); карбюризатор – 37,68 МДж/кг (10,47 кВт · ч), природный газ – 35,59 МДж/кг (9,88 кВт · ч).

Сравнение потребляемой энергии коксовой и газовой вагранками по данным исследований фирмы DUKER

Функция	Удельный расход на тонну расплава							
	Вид энергии	Коксовая вагранка				Газовая вагранка		
		С хол. дутьем + кислород		Горячее дутье		Вид энергии	К-во	МДж
		К-во	МДж	К-во	МДж			
Розжиг вагранки	Ма-зут	0,5	18,8	0,5	18,8	Прир. газ	4,47 м ³	159,1
Плавление	Кокс, O ₂	100 кг	3684,4	140	4689	Прир. газ	-50 м ³	1179
		20 м ³	36,0			Кислород	6 м ³	10,8
Науглераживание	—	—	—	—	—	Карбюратор	—	268,0
Охлажденная вода	—	—	—	1,5 кВт·ч	5,4	Эл. ток	0,7 кВт·ч	2,7
Воздуходувка	Эл. ток	5 кВт·ч	18,0	5 кВт·ч	18,0	-/-	3 кВт·ч	10,8
Удаление пыли		25 кВт·ч	90,0	25 кВт·ч	90,0	—	—	—
Рекуператор	Ма-зут	—	—	—	—	—	—	—
Выброс газа	-/-	1 кг	37,7	1 кг	37,7	—	—	—
Выравн. темпер., десульфурация	Эл. ток	11,5 кВт·ч	41,4	11,5 кВт·ч	41,4	—	—	—
Перегрев в индукц. копильнике	—	—	—	—	—	Эл. ток	59 кВт·ч	212,4
<i>Итого:</i>	—	—	3926,3	—	4976	—	—	2443,3

Экологические аспекты плавки чугуна в газовых вагранках.

Экологическая ситуация при переходе с кокса на природный газ изменяется коренным образом. Выделение пыли, CO, SO₂ в атмосферу уменьшается в несколько раз.

В результате обследований выбросов вредных веществ в атмосферу от газовых вагранок, проведенных фирмой «Эльфа» НПО «ИНИЭКс», г. Нижний Новгород, определено, что от газовых вагранок

нок, оборудованных сухим искрогасителем, в атмосферу выбрасывается окиси углерода 0,0126 г/с, двуокиси азота 0,0032 г/с, сернистого ангидрида 0,00063 г/с, взвешенных веществ 0,58 г/с. От вагранки, оборудованной мокрым пылеуловителем, взвешенные вещества (пыль) составили 0,29 г/с.

4.5. Эффективность электроплавки с использованием ЭДП

Дуговые печи переменного тока. Для плавки черных металлов чаще всего используются дуговые печи (ДП) переменного тока, технические возможности которых позволяют выплавлять широкую гамму сплавов с высокими показателями качества при использовании низкосортной шихты, что выгодно отличает их от индукционных печей, «пассивных» в металлургическом отношении.

Однако дуговые плавильные печи переменного тока наносят большой вред окружающей среде. Строительство мощных устройств пыле- и газоочистки для защиты воздушного бассейна требует почти таких же средств, как на приобретение и установку этих печей.

К недостаткам ДП переменного тока следует также отнести сравнительно высокий уровень удельного расхода электроэнергии, графитированных электродов (до 5,5 кг/т и более), угар шихтовых материалов и ферросплавов (3,5–6 %), а также высокий уровень шума (до 103–105 дБА).

Рациональные режимы работы электродуговых печей. Весьма большое влияние на расход электроэнергии при плавке в дуговых печах оказывают применяемая технология плавки и режимы работы печей. Влияние этих факторов в ряде случаев может быть более значительным, чем влияние, оказываемое электрическими и тепловыми потерями печи.

Существенное улучшение показателей работы, в частности значительное уменьшение удельного расхода электроэнергии, получается при более крупных печах и при проведении плавки с увеличенным (против номинальной емкости) весом завалки. К числу эффективных мероприятий следует также отнести:

- 1) применение газообразного кислорода в периоды плавления и окисления;
- 2) плавку в печах с кислой футеровкой;
- 3) работу печей при рациональных режимах;

- 4) интенсификацию процессов плавления, окисления и восстановления при плавке;
- 5) сокращение продолжительности перерывов в работе печей, как между плавками, так и по ходу плавки;
- 6) увеличение срока службы футеровки печи и уменьшение количества ремонтов;
- 7) подогрев шихтовых и легирующих материалов до загрузки их в печь;
- 8) ускорение различных вспомогательных работ при плавке путем их механизации.

Значительное понижение удельного расхода электроэнергии дает работа дуговых печей на жидкой завалке, но вследствие ряда серьезных производственных затруднений такой способ плавки не получил пока заметного распространения.

4.6. Нарращивание массы плавки как способ повышения энергоэффективности процесса

Уменьшение удельного расхода электроэнергии в ЭДП происходит с наращиванием объема плавки. Это объясняется меньшими тепловыми и отчасти электрическими потерями таких печей. Применение крупных печей приводит к понижению стоимости передела 1 т стали и сокращению других расходов при плавке стали, т. е. является экономически весьма целесообразным. Однако выбор номинальной вместимости печей определяется, прежде всего, масштабом и характером производства, требованиями к качеству стали, условиями разливки и другими технологическими обстоятельствами. Поэтому следует выбирать дуговые печи наибольшей вместимости, допустимой с точки зрения производственных и технологических соображений.

Печи с кислой футеровкой имеют примерно на 20 % меньший удельный расход электроэнергии, чем печи с основной футеровкой; это объясняется упрощенной технологией плавки и пониженными тепловыми потерями.

Благоприятное влияние на показатели работы дуговых печей, в частности, на удельный расход электроэнергии оказывает не только применение более крупных печей, но и увеличение массы плавки сверх номинальной вместимости печи. Этот факт давно установлен передовыми электросталеваарами и широко использовался в их повседневной работе.

При увеличении массы плавки продолжительность ее отдельных периодов возрастает в меньшей степени, чем выпуск стали за плавку, в результате чего увеличивается удельная производительность печи и уменьшаются тепловые и электрические потери, приходящиеся на 1 т стали.

Увеличение веса плавки не может быть безграничным. Помимо того, что оно ограничено вместимостью самой печи, при чрезмерном увеличении веса плавки значительно возрастает глубина ванны стали и ее поверхность приближается к своду печи. В результате этих обстоятельств замедляются металлургические процессы (нагрев стали, кипение ванны, удаление из стали вредных примесей и т. д.), резко понижается стойкость футеровки печи, особенно ее свода. Кроме того, начинают заметно увеличиваться тепловые потери печи.

Масса плавки, при которой получают наилучшие значения основных показателей работы печи, называется целесообразной массой.

Значения целесообразной массы, выраженная в долях номинальной вместимости печи, больше для небольших печей и меньше для крупных печей. Она увеличивается в том случае, если большую часть плавки занимает период плавления шихты (например, в печах с кислой футеровкой), и уменьшаются для плавки высококачественной стали, в которых значительная часть всего времени приходится на периоды окисления и восстановления.

В среднем для небольших печей влияние массы плавки (в долях номинальной вместимости печи) следующим образом сказываются на цифрах удельного расхода электроэнергии (в процентах к расходу при номинальной вместимости):

Масса плавки	0,5	0,8	1,0	1,4–1,6	1,8–2,0
Удельный расход электроэнергии, %	120–130	108–110	100	88–90	85–88

Естественно, что систематически работать при массе плавки меньшей, чем номинальная вместимость печи, неэкономично. Такой способ работы можно применять только в отдельных случаях, когда по производственным причинам (например, изготовление мелких отливок) невозможно работать при целесообразной или номинальной массе плавки.

4.7. Применение газообразного кислорода

Значительная экономия электроэнергии может быть получена в результате применения кислорода, так как при этом происходит энергичное окисление железа и других элементов металлической шихты с выделением большого количества тепловой энергии, идущей на ускорение процессов плавки. Особенно эффективно применение кислорода при плавке шихты, имеющей в своем составе много высоколегированных отходов, в которых содержится большое количество легко окисляющихся элементов (кремния, алюминия, хрома и т. п.).

При плавках углеродистой и низколегированной стали целесообразность применения кислорода зависит от стоимости кислорода, которая определяется главным образом мощностью кислородной станции и способом доставки кислорода.

Для ряда печей небольшой емкости (1,5–5 т) кислород применяется в период плавления для подрезки шихты, после чего трубка погружается под шлак в образовавшуюся ванну жидкого металла и с помощью кислорода производится окисление углерода и других примесей.

Средние результаты, полученные при таком способе работы, приведены в табл. 10.

Таблица 10

Средние результаты при применении газообразного кислорода

Наименование показателей	Период плавления		Окислительный период	
	Без кислорода	С кислородом	Без кислорода	С кислородом
Продолжительность периода, мин	60–80	40–60	25–35	10–15
Уд. расход электроэнергии, кВт · ч /т	450–500	380–420	120–180	80–120
Уд. расход кислорода, м ³ /т	–	8–12	–	4–6
Уд. расход стальных трубок, кг/т	–	0,6–0,8	–	0,3–0,5

При высокой стоимости кислорода, доставляемого в баллонах, затраты на кислород и стальные трубки несколько превышают стоимость сэкономленной электроэнергии, однако если учесть уменьшение накладных расходов при сокращении продолжительности плавки, то даже при

высокой стоимости кислорода его применение будет оправданным. Более благоприятные условия имеются на заводах, пользующихся жидким кислородом и получаемым от крупных кислородных станций по кислородопроводу, так как его стоимость незначительна.

Изучение энергетических режимов работы печей, в которых продувка кислорода применяется только в период плавления шихты, показало, что, помимо существенного улучшения показателей этого периода, имеют место также сокращение продолжительности и уменьшение расхода электроэнергии в последующие периоды плавки. Это можно объяснить более высоким нагревом металла к концу периода плавления при пользовании газообразным кислородом. Так, например, в печах емкостью 3 т с основной и кислой футеровкой при плавке углеродистой стали окислительный и восстановительный периоды сократились на 5–10 мин, а удельный расход электроэнергии уменьшился на 15–20 кВт · ч /т. Особенно значительные результаты были получены при плавках низколегированной стали (в среднем 14 мин и 48 кВт · ч /т).

Широко применяется газообразный кислород при электроплавке стали на крупных электрометаллургических заводах.

При плавках такой высоколегированной стали, как 1X18H9T и подобных ей, эффективность применения кислорода в отношении сокращения продолжительности и уменьшения расхода электроэнергии тем выше, чем раньше в период плавления шихты начинается продувка кислорода, но при этом заметно возрастает угар хрома, который затем нужно восполнять присадкой в печь феррохрома. Поэтому подрезки шихты струей кислорода при плавках высоколегированной стали обычно не производят, а начинают продувку кислорода после расплавления половины всей завалки, причем трубку с кислородом погружают в ванну жидкой стали. При таком способе работы угар хрома уменьшается приблизительно в 2 раза и общий экономический эффект от применения кислорода получается более значительным, чем при раннем введении кислорода, осуществляемом при плавках углеродистой и низколегированной стали для фасонного литья.

4.8. Работа ДСП в рациональных режимах

Для улучшения показателей дуговых печей необходимо, чтобы печи работали при рациональных энергетических режимах, обеспечивающих их наибольшую производительность и наименьший удельный расход электроэнергии при плавке.

Разработанные методы дают возможность устанавливать рациональные режимы дуговых печей. Применение этих методов дало положительные результаты и показало, что при внедрении рациональных режимов в практику работы печей достигаются существенное сокращение продолжительности плавки (на 10–25 %) и заметное уменьшение удельного расхода электроэнергии (на 8–15 %).

Наиболее удобным для заводских условий является упрощенный метод установления рациональных режимов, который основан на обработке экспериментальных данных, полученных непосредственно в процессе плавки, отдельно для периодов плавления, окисления и восстановления.

Период плавления шихты. Для правильного установления рациональных режимов в период плавления шихты необходимо выявить влияние на показатели работы печей ряда факторов, в том числе следующих:

- активной средней мощности; веса завалки;
- ступеней вторичного напряжения;
- реактивности дросселя;
- качества шихты;
- продолжительности перерыва между плавками и износа футеровки печи.

Ниже кратко рассмотрено влияние перечисленных факторов на значения удельного расхода электроэнергии в период плавления шихты.

Изучение работы дуговых печей показало, что практически чаще всего имеют место два случая.

В первом случае рабочие значения активной мощности не достигают того значения, которое соответствует наименьшему удельному расходу электроэнергии, а во втором случае рабочие значения активной мощности располагаются между наименьшими удельными расходами электроэнергии при минимальном расходе э/энергии и минимальной продолжительности плавки.

Пример второго случая. Печной трансформатор печной установки емкостью 5 т с кислой футеровкой имеет большой запас мощности и позволяет вести плавление при мощности до 3000 кВт. Раньше эта печь, работая при мощности 2500–3000 кВт, расходовала в период плавления 450–520 кВт · ч /т при продолжительности плавления 10–11 мин/т.

Анализ полученных зависимостей показал, что рациональные пределы мощности лежат в области меньших значений, поэтому в качестве новых рабочих пределов были установлены значения мощно-

сти 2300–2500 кВт, в результате чего расход электроэнергии сократился до 430–450 кВт · ч /т при увеличении продолжительности плавления всего на 1 мин/т, или в целом для всей плавки на 5–6 мин.

Таким образом, во втором случае может оказаться разумным уменьшить мощность печной установки, что и было сделано для данной печи.

Опыт передовых сталеваров достаточно четко выявил то важное положение, что рабочие значения мощности следует повышать при увеличении веса плавки и что при этом улучшаются показатели работы печи.

Действительно, в тех случаях, когда увеличение веса плавки не сопровождается надлежащим повышением мощности печной установки, оно оказывается малоэффективным.

Способы увеличения активной мощности печных установок. Прежде всего, полностью используется в период плавления номинальная мощность печных трансформаторов, что уже является значительным шагом вперед, так как в настоящее время на многих дуговых печах трансформаторы загружены всего до 80 %. Однако этого недостаточно, поэтому используют конструктивные запасы печных трансформаторов, перегружая их сверх номинальной мощности в допустимых пределах. При возможности целесообразно создать усиленное воздушное охлаждение кожуха трансформатора.

Опыт показал, что усиленное обдувание трансформатора холодным воздухом от вентилятора позволило повысить среднюю мощность в период плавления с 1000–1200 до 1 250–1400 кВт и тем самым заметно улучшить показатели работы печи.

В некоторых случаях переделывали печные трансформаторы с воздушного охлаждения на внешнее водяное, что дало возможность повышать номинальную мощность трансформатора на 15–20 %.

На удельном расходе электроэнергии положительно сказывается уменьшение реактивности дросселя с 33 до 22,4 % в печи с основной футеровкой и с 25 до 15 % в печи с кислой футеровкой.

Имеется опыт работы других печей, из которого следует, что для более крупных печей с основной футеровкой, например номинальной емкостью 12 т, достаточна реактивность дросселя 15 %, а для печей с кислой футеровкой емкостью 5 т – реактивность 10 %, а иногда и ниже.

В любой печной установке после прекращения больших колебаний мощности и величины тока разумно шунтировать дроссель, причем момент шунтирования зависит от качества шихты, характери-

ки защиты печной установки и точности работы автоматического управления перемещением электродов. Например, для дуговых печей емкостью до 12 т при средних условиях работы оказалось целесообразным дроссель шунтировать по истечении 60–65 % периода плавления, а при благоприятных условиях (чистая шихта, тщательная загрузка ее в печь, высокая точность работы автоматического управления, достаточно большая выдержка защитных реле) было установлено, что дроссель следует шунтировать после того, как пройдет всего 30–40 % периода плавления.

Исследованиями установлено, что увеличение объемного веса шихты приводит к повышению средней, активной мощности печной установки и до известного предела благоприятно влияет на значения удельного расхода электроэнергии.

Однако, вопреки весьма распространенному мнению, плавление чрезмерно плотной шихты вызывает повышение удельного расхода электроэнергии, т. к. электрические дуги при этом горят почти все время открыто и излучают весьма большое количество тепла на свод и стены печи.

С другой стороны, при плавлении весьма рыхлой шихты с объемным весом ниже 2 т/м^3 увеличиваются воздушные промежутки между отдельными кусками шихты, чаще обрываются электрические дуги, увеличиваются броски тока, снижаются средние значения мощности дуг и печной установки. Кроме того, через большие воздушные промежутки усиливается отдача теплоты от электрических дуг на стены и свод печи, в результате чего возрастают тепловые потери через футеровку.

При рыхлой шихте неизбежны подвалки шихты по ходу плавления, которые заметно ухудшают показатели работы в период плавления.

Увеличение продолжительности перерыва особенно сказывается на возрастании удельного расхода электроэнергии.

На первых плавках после ремонта происходит «нагрев» футеровки, в результате чего наименьший расход электроэнергии в больших печах имеет место в пятой–седьмой плавках после ремонта. Затем по мере износа футеровки расход электроэнергии постепенно растет. Увеличение продолжительности перерыва между плавками и износ футеровки печи сказываются не только на показателях периода плавления, но также и на показателях остальных периодов плавки, однако основное влияние этих факторов проявляется все же в период плавления шихты.

По ГОСТ 7207–54 для серии новых дуговых печей были предусмотрены следующие номинальные мощности печных трансформаторов.

Номинальная емкость печи, т	Номинальная мощность печного трансформатора, кВ · А
3,0	1500
5,0	2800
10,0	5000
20,0	9000

Номинальные мощности этих печных трансформаторов дают возможность работать при рациональных значениях мощности.

Периоды окисления и восстановления при кислоте процессе плавки. В окислительный период пониженный удельный расход электроэнергии может быть получен при работе печи с увеличенной массой плавки, при более высоком напряжении, при меньшем количестве окисленного углерода и при повышенном содержании углерода в конце периода.

Для плавки увеличенного веса целесообразно применять повышенную мощность печной установки. Особенно большое значение для уменьшения расхода электроэнергии имеет ограничение количества окисляемого углерода. Как показывает опыт, достаточно окислять 0,2–0,3 % углерода в зависимости от качества исходных материалов и требований к выплавляемой стали. Из табл. 11 видно, что при несоблюдении указанного положения расход электроэнергии в окислительный период может увеличиться более чем в 2 раза.

Таблица 11

Расход электроэнергии в раскислительный период

Количество окисляемого углерода, %	Продолжительность периода, мин	Расход электроэнергии, кВт · ч
0,33	35	2232
0,35	45	2356
0,55	55	3730
0,83	65	4712

Приблизительно можно считать, что целесообразные значения напряжения в окислительный период плавки составляют 0,75–1,0 значений напряжений в период плавления шихты.

Основная задача, которая определяет выбор режима работы в окислительный период, состоит в том, чтобы провести этот период энергично, окислить необходимое количество углерода со скоростью не ниже 0,4–0,5 % в час и нагреть металл до нужной температуры, обычно близкой к температуре готовой стали, выпускаемой из печи. При этом не только обеспечивается требуемое качество стали, но и облегчается проведение восстановительного периода. Лучше сохраняется футеровка печи и улучшаются технико-экономические показатели плавки в целом.

Вопрос о целесообразных значениях напряжения в восстановительный период должен решаться с учетом электротехнических соображений, технологических и тепловых условий проведения этого периода плавки.

По совокупности условий работы печей, в восстановительный период можно считать, что применяемые напряжения должны быть невысокими и, кроме того, по ходу восстановительного периода они, как правило, должны понижаться или (в малых печах) сохраняться на неизменном уровне; при этом понижаются также значения средней мощности.

Исходя из условий горения электрических дуг в зависимости от состава шлака, наибольшие напряжения следует применять при кислом и полукислом шлаке, средние – при белом известковом шлаке и наименьшие – при карбидном шлаке.

Однако применяемые напряжения не должны быть чрезмерно низкими, т. к. при этом электроды погружаются в шлак, происходит науглероживание стали, растет расход электродов, а также увеличивается удельный расход электроэнергии (табл. 12).

Таблица 12

Удельный расход электроэнергии в восстановительный период плавки низкоуглеродистой стали

Характеристика печи	Степень линейного напряжения, В	Средний удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т
Печь емкостью 3 т с основной футеровкой	105	110
	124	85
Печь емкостью 5 т с кислой футеровкой	100	95
	130	65

В печах с кислой футеровкой часто всю плавку проводят при одной и той же высшей ступени напряжения, получая при этом хоро-

шие показатели работы, без ухудшения стойкости футеровки печи и без понижения качества выплавляемой стали.

При плавке легированной стали удельный расход электроэнергии тем выше, чем большее количество легирующих добавок дается в восстановительный период плавки; при этом целесообразно повышать значение средней мощности.

Для уменьшения расхода электроэнергии при плавке средне- и высоколегированной стали следует применять предварительный подогрев легирующих добавок в пламенных печах, работающих на жидком или газообразном топливе.

4.9. Интенсификация процессов плавки

Значительная экономия электроэнергии может быть получена путем интенсификации отдельных процессов плавки.

Предварительный подогрев шихты. Стоимость единицы теплоты, полученной из электроэнергии, в настоящее время в 4–6 раз превышает стоимость той же единицы, полученной при сжигании газообразного топлива. Поэтому, даже с учетом более высокого КПД при электрическом нагреве, экономически выгодно подогревать шихту до плавки пламенем сжигаемого газа.

Такой предварительный нагрев наиболее удобно делать при механизированной загрузке шихты в печь с помощью бады; при этом он может выполняться различными способами.

В зарубежной практике применяется предварительный подогрев шихты мазутными форсунками до 900–1000 °С непосредственно внутри самой дуговой печи.

Для этой цели корпус печи с загруженной с помощью бады шихтой подводится под камеру сжигания с форсунками и затем после нагрева шихты передвигается под мостовую конструкцию с укрепленными на ней электродами и сводом печи. Однако при таком устройстве или нужно мириться с низким коэффициентом использования электрооборудования печи, которое простаивает во время нагрева шихты, или нужно иметь на 1 комплект электрооборудования два корпуса печи, что значительно усложняет печную установку.

Отечественные установки для подогрева шихты рассчитаны на нагрев пламенем природного газа, сжигаемого в горелках, расположенных по окружности горна, на котором устанавливается обычная бадя с шихтой. В этом случае происходит нагрев нижней части бады и затем находящейся в баде шихты. Другой тип установки отли-

чается тем, что на ней пламенем сжигаемого газа нагревается специальная бадья прямоугольной формы с отверстием 500×500 мм в дне, закрытом решеткой. Такое устройство бадьи обеспечивает лучший прогрев всего слоя шихты.

Помимо сокращения продолжительности плавления и уменьшения удельного расхода электроэнергии, предварительный подогрев шихты способствует понижению расхода электродов и огнеупоров, а также улучшает условия работы электрооборудования (в частности, печного трансформатора) в результате значительного уменьшения бросков тока. Как уже указывалось выше, при этом оказалось возможным проводить весь период плавления при выключенном (шунтированном) дросселе.

В Германии на некоторых предприятиях подогрев до 700°C шихты и легирующих добавок производится в стальных литых мульдах, нагреваемых в печи для прокалики шлакообразующих материалов, обогреваемой пламенем сжигаемого генераторного газа. Нагретая шихта с помощью загрузочной машины из мульд перекладывается в загрузочную бадью и затем загружается в печь емкостью 5 т. Шихта состоит из прокатных обрезков различных размеров, сверху которых в бадью загружается стружка. Подогрев 5 т шихты производится 4–4,5 ч; на него расходуется $1\,031\text{ м}^3$ газа с калорийностью 1620 ккал/м^3 .

При подогреве шихты продолжительность плавления в среднем уменьшается с 94,3 до 61,1 мин, а расход электроэнергии сокращается на $174\text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Сокращение окислительного периода. Помимо применения газообразного кислорода и уменьшения (в допустимых пределах) количества окисленного углерода, продолжительность окислительного периода при плавках в печах с основной футеровкой может быть уменьшена также частичным совмещением процессов окисления и плавления шихты. Для этой цели известь и часть всей расходуемой на окисление руды даются или вместе с шихтой, или во второй половине периода плавления.

После расплавления металла удаляется большая часть шлака, и окисление заканчивается при продувке через ванну газообразного кислорода или в результате присадок остальной части руды; иногда применяются последовательно оба эти окислителя. Эффективность достигается при совмещении части окислительного периода с плавлением за счет сокращения окислительного периода.

Сокращение восстановительного периода (раскисления при кислых процессах плавки). Кроме высокого нагрева металла при

окислении, уменьшение продолжительности этого периода при плавках в печах с основной футеровкой может быть достигнуто ускорением процессов раскисления, десульфурации и выравнивания состава стали. Из применяемых способов раскисления при плавке в дуговой печи лучшие значения показателей в восстановительный период дает способ непосредственного раскисления стали кусковыми раскислителями.

Считается, что непосредственное и смешанное раскисление могут применяться только для стали, идущей на изготовление стальных отливок, а для высококачественной стали необходимо производить раскисление через шлак, чтобы уменьшить содержание в стали неметаллических включений.

Для сокращения восстановительного периода на отдельных заводах применяется раскисление низкоуглеродистой стали кусковыми раскислителями после выпуска ее в ковш; при этом, помимо уменьшения угара раскислителей и других технологических преимуществ, получается также понижение удельного расхода электроэнергии.

Следует отметить, что при замене раскисления через шлак смешанным раскислением ускоряется также процесс десульфурации (удаление серы из стали).

Для ускорения растворения легирующих добавок и равномерности их распределения в жидкой стали такие добавки рекомендуются вводить в сталь как можно раньше. Малоокисляющиеся добавки (например, никель, кобальт, ферромolibден) вводят в завалку или загружают в печь в периоды плавления и окисления. Другие добавки (например, ферровольфрам, феррохром) даются в начале восстановительного периода, что способствует также сокращению продолжительности периода и уменьшению удельного расхода электроэнергии.

Электромагнитное перемешивание ванн стали. Основной причиной, ограничивающей скорость металлургических процессов, происходящих при электроплавке стали, является недостаточность перемешивания ванны стали и шлака, особенно к концу окислительного и в течение восстановительного периода.

Существует несколько способов перемешивания ванны дуговой печи, из которых, по-видимому, наиболее эффективным является способ электромагнитного (или индукционного) перемешивания. Схема устройства и работы электромагнитного (индукционного) перемешивателя приведена на рис. 1. Перемешиватель 2, имеющий форму дугового статора, устанавливается под корпусом печи, подовая часть 3 которого делается из немагнитной (обычно нержавеющей стали).

Обмотки АХ и ВУ перемешивателя 2 питаются низкочастотным (0,5–2 Гц) двухфазным током, создающим бегущую волну 1 магнитного потока Φ . Бегущее магнитное поле индуцирует в жидкой стали 4 вихревые токи, условно показанные в виде кружков. В результате взаимодействия этих токов с магнитным потоком Φ слой жидкой стали приводятся в движение, направление которого показано стрелками. При этом нижние слои стали перемещаются в верхнюю часть ванны и сталь перемешивается по всей глубине ванны. Шлак, находящийся над жидкой сталью, увлекается ею, перемещается по направлению к рабочему окну и при небольшом наклоне печи может удаляться из печи в шлаковню. Поэтому подобный режим работы перемешивателя называется режимом «скачивания».

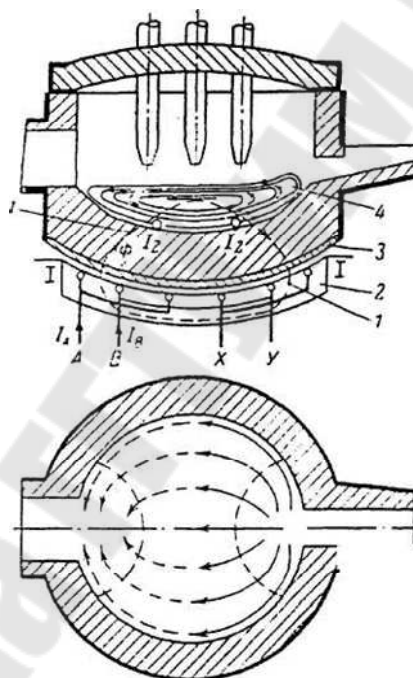


Рис. 1. Схема устройства и работы электромагнитного (индукционного) перемешивателя

Обмотка фазы АХ состоит из двух частей, которые могут включаться так, что вместо бегущего магнитного поля получится перемешивающее поле, образованное встречными магнитными потоками фаз. Такой режим «перемешивания» предназначен для перемещения нижних слоев жидкой стали вверх примерно в центре ванны печи.

Опыт работы зарубежных дуговых печей, а также печей, работавших на Чебоксарском заводе промышленных тракторов и других предприятиях, выявил следующие результаты действия перемешивателей:

1. При работе перемешивателей ускоряются раскисление и десульфурация стали, а также растворение в стали легирующих добавок и выравнивание состава и температуры стали в восстановительный период плавки, вследствие чего продолжительность этого периода может быть сокращена на 25–40 мин.

2. Уменьшение расхода электроэнергии на плавку составляет 40–50 кВт · ч /т (что более чем в 2 раза превышает дополнительный расход электроэнергии, вызываемый перемешивателем и составляющий 12–20 кВт · ч/т).

3. При работе перемешивателя несколько облегчается удаление шлака из печи.

4. Дополнительные затраты на комплектную перемешивающую установку окупаются в срок от 1,5 до 3,5 лет.

Положительный опыт работы электромагнитных перемешивателей позволил оборудовать ими печи емкостью 20 т и более.

Кислая электроплавка. Плавка в печах с кислой футеровкой характеризуется меньшим удельным расходом электроэнергии, чем в печах, но с основной футеровкой.

Анализ цифр показывает, что основная часть экономии электроэнергии при кислой электроплавке стали получается за счет сокращения продолжительности окислительного и восстановительного периодов плавки.

Окислительный период сокращается главным образом потому, что при кислой электроплавке вследствие меньшего содержания растворенных в стали газов (водорода и азота) можно ограничиться меньшим количеством окисленного углерода (табл. 13).

Таблица 13

Сопоставление показателей в восстановительный период плавки в печах с кислой и основной футеровкой

Вес плавки, т	Продолжительность восстановительного периода в печах, мин		Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т	
	С кислой футеровкой	С основной футеровкой	С кислой футеровкой	С основной футеровкой
2–3	20–25	25–35	80–100	100–140
4–5	25–30	35–45	70–90	80–120
6–8	30–35	45–55	60–80	70–110

Сокращение восстановительного периода обусловлено преимущественно тем, что раскисление стали ускоряется действием на нее не

только шлака, но и кислой футеровки ванны печи. Кроме того, при кислой электроплавке не происходит десульфурации стали и требования к качеству выплавляемой стали являются менее жесткими.

Следует отметить, что до недавнего времени кислая электро-сталь обладала несколько худшими пластичностью и ударной вязкостью, чем основная. Усовершенствование процесса кислой электроплавки за последние годы позволяет теперь выплавлять в кислых дуговых печах стали различного состава, в том числе и легированные стали ответственного назначения.

4.10. Повышение энергоэффективности плавки с использованием электродуговых печей постоянного тока

Российской научно-технической фирмой «ЭКТА» разработан новый тип плавильных электродуговых печей, работающих на постоянном токе.

Результаты работы ДППТ на промышленных предприятиях показали их высокую технико-экономическую эффективность.

Конструктивно ДППТ имеет стальной футерованный кожух, образующий ванну печи, свод (может быть водоохлаждаемым), механизмы наклона печи для слива металла и удаления шлака, перемещения графитированного электрода, отворота свода или выката ванны для завалки печи шихтой, рабочее окно с дверцей и сливной желоб в кожухе.

В отличие от дуговых печей переменного тока ДППТ имеют один графитированный электрод, расположенный вдоль вертикальной оси печи, и один или несколько электродов, установленных в подине печи.

В печах с емкостью ванны 6 и более тонн устанавливается несколько подовых электродов, каждый из которых подключен к полюсу автономного источника электропитания, минусы которых объединены на токоподводе графитированного электрода, проходящего через свод печи.

Такое решение позволяет оснащать печи силовыми модулями и обеспечивает ряд дополнительных преимуществ, связанных с организацией направленного перемешивания расплава, повышением надежности, снижением веса и габаритов трансформаторного оборудования.

Подовые электроды выполняются по особой технологии, безопасны в работе и представляют собою металлические стержни, охла-

ждаемые водой. Для безопасности эксплуатации каналы охлаждения вынесены за кожух печи, а в теле подовых электродов установлены датчики контроля состояния.

Печи ДППТ футеруются огнеупорными материалами, применяемыми для печей ДСП. Стойкость подины при обычных «горячих» ремонтах составляет около 3 лет или до 5 тысяч плавов. Подина может быть наварена после «срывов», подвергнута промежуточному ремонту без замены подовых электродов. Стойкость подового электрода при работе без «болота» равняется сроку службы подины.

Процесс плавки в ДППТ практически имеет те же технологические приемы: продувка металла кислородом, инертным газом, обработка шлаком, легирование, что и в ДСП.

Управляемое перемешивание расплава улучшает и ускоряет металлургические процессы. Сочетание заданного направления и скорости движения металла с тепловым потоком от дуги позволило удерживать локальный нагрев расплава на уровне температуры, не превышающей 5–7 % от средней температуры расплава во все периоды плавления. Это обеспечило значительное снижение угара элементов сплава при плавке.

Имеется возможность подавать в зону дуги нейтральный газ и увеличить газоплотность печи, т. е. создать условия нейтральной атмосферы.

Электропитание ДППТ. Электроснабжение печей постоянного тока осуществляется от силовых источников питания, каждый из которых подключен к одному подовому электроду.

В электрическую цепь, плюс которой подключен к подовому электроду, а минус к графитизированному электроду, входят: сетевые реакторы, трансформаторы, тиристорные шести или двенадцатипульсные преобразователи и сглаживающие реакторы.

Независимо управляемые тиристорные преобразователи, число которых равно числу подовых электродов, подключаются или каждый к своему трансформатору, или к независимым обмоткам низкой стороны одного трансформатора.

Преобразователь имеет источник электропитания с четырьмя преобразовательными тиристорными секциями и соответствующей системой их переключения. Это позволило плавку вести при постоянной мощности с умеренной тепловой нагрузкой на стены и свод печи.

Источник электропитания может быть установлен вдали от печи, в том числе вне цеха. Это позволяет при реконструкции печей переменного тока и переводе их на постоянный ток проводить основной

монтаж источника без остановки действующей печи. Реконструируемая печь выключается на непродолжительный срок только для подключения к новой питающей сети.

В ряде случаев может быть использован трансформатор ДСП, однако предпочтительнее применять трансформаторы со специальными характеристиками, учитывающими особенности нагрузки. В состав электропитания печи входят устройства для компенсации реактивной мощности и специальное оборудование, параметры которого обеспечивают уменьшение влияния высших гармоник напряжения на питающую энергосеть.

При выборе типа печей большое значение имеют затраты на электроснабжение. При этом учитывается полная мощность печного трансформатора, отношение мощности энергосистемы к мощности короткого замыкания на вводах печного трансформатора.

Для ДППТ емкостью до 100 т при продолжительности расплавления 40 мин прогнозируемая мощность трансформатора составит 80 МВА, отношение мощности питающей энергосистемы к мощности короткого замыкания на вводе печного трансформатора ДППТ может быть 15–20, т. е. ДППТ можно подключать к менее мощным энергосистемам.

На ДППТ производится независимое управление током и напряжением, обеспечивающее реализацию концепции ведения режима плавки, перемешивания расплава, защиты футеровки, снижения угара металла, пылегазовыбросов и шума, генерируемого печью во все периоды плавки, а также колебания мощности нагрузки.

Колебания мощности в начале расплавления находятся в пределах 20–30 %, а через 10–15 минут после включения не превышают 3–5 %. Коэффициент мощности 0,80–0,72. Минимальный удельный расход электроэнергии при плавке стали – 485 кВт · ч/т.

Система автоматизации управления использует микропроцессорную технику.

Технические особенности плавки металла в ДППТ. Процесс плавки разделен на три периода, которые проводят на постоянной мощности дуги:

Период 1 – подготовительный, его проводят на высоком напряжении и небольшом токе дуги. Режим дуги позволяет вести расплавление шихты без привязки анодного пятна на расплав. Длинная дуга обеспечивает стабильный электрический режим, интенсивный нагрев печных газов, плавный нагрев всего объема шихты. Локальный пере-

грев металла не возникает, т. к. капли металла, нагреваясь, преодолевают силы поверхностного натяжения и немедленно стекают вниз. В периоде 1 отгоняются органические загрязнения шихты, пары которых выходят из отверстия в своде и догорают до завершённых оксидов. Во всех периодах плавки колебания активной мощности по сравнению со средним значением не превышают $\pm 10\%$. Колебания давления в печи, за счёт стабилизации электрического режима, подавлены, и подсос воздуха в печь не наблюдается. В течение периода 1 в шихте образуется расширяющаяся вверх воронка, которая в периоде 2 исключает обрушивание шихты на сводовый электрод и замораживание металла на подине.

Период 2 – энергетический. Обеспечивается стабильный электрический режим при колебании мощности не более $\pm 5\%$. Этот режим способствует быстрому расплавлению шихты и не приводит к заметному локальному перегреву металла.

Ток дуги удваивают, а напряжение в 2 раза снижают. В начале периода 2 анодное пятно дуги располагается на расплаве. Основная мощность дуги излучением и конвекцией печных газов передается на шихту, которая продолжает плавиться, и около 20 % мощности дуги передается через анодное пятно в расплав. Перегрев расплава под дугой в периодах 2 и 3 предотвращается размещением подовых электродов, формирующим тороидальное вращение металла в вертикальной плоскости, при котором поток металла с большой скоростью подтекает под дугу и уходит в глубь расплава. В этих условиях температурное поле расплава выравнивается из-за интенсивной конвективной теплопередачи через расплав, а высокая скорость движения металла под дугой не допускает его локального перегрева. Снижению удельного теплового потока через анодное пятно дуги способствует низкая плотность тока в нем и наличие шлакового покрова. Во всех периодах плавки происходит минимальный угар металла, не образуется первичный шлак. В этих условиях состав шлака и его активность можно регулировать подачей шлакообразующих элементов. Образованный шлак жидкоподвижен и из-за интенсивного перемешивания металла эффективно взаимодействует с расплавом.

Период 3 – технологический. Третий режим по сравнению с первым проводится при короткой дуге с напряжением, в четыре раза сниженном, и силе тока, в четыре раза увеличенной. При этом происходит доплавление шихты, нагрев расплава, рафинирование и перемешивание расплава и шлака. В процессе рафинирования нагрев ме-

талла ведется на полной мощности при коротких включениях дуги. Доля энергии, передаваемой в этот период непосредственно от дуги к расплаву, превышает 80 % подведенной. Интенсивная теплопередача от дуги к расплаву реализуется под воздействием поля электромагнитных сил в расплаве. Этому способствует специальная схема размещения подовых электродов и токоподводов к ним. Соответствующие режимы регулирования силой тока дуги обеспечивают устойчивое управляемое перемешивание расплава в вертикальной и горизонтальной плоскостях с максимальной скоростью движения расплава из-под дуги вглубь ванны. Это предотвращает локальный перегрев, т. к. нагреваемый под дугой металл быстро замещается набегающим «холодным» расплавом. Перемешивание также препятствует возникновению локальных вихрей над подовыми электродами, предотвращая их разрушение. Скорость теплопередачи от дуги к расплаву увеличивается пропорционально росту силы тока. Это позволяет поддерживать указанный механизм плавления в широком интервале подводимой удельной мощности (от 0,3 до 8,0 кВт/кг шихты) в печах малой, средней и большой (до 100 т) емкости, обеспечивая их высокую производительность. Продолжительность расплавления в ДППТ ограничивается теплопроводностью массивных кусков шихты и допустимой мощностью источников электропитания и составляет 30–40 мин.

При эксплуатации ДППТ в 7–10 раз уменьшается пылегазовыброс в процессе расплавления шихты при значительном уменьшении угара металла. В своде печи выполняется второе отверстие, через которое из печи выходят (а не отсасываются) образующиеся при плавке газы и забираются установленным над печью зонтом в систему газоочистки. Выбор производительности системы пылегазоулавливания зависит от качества шихты и технологического процесса и производится для конкретных условий.

Как показали замеры при работе 25-тонной электродуговой печи постоянного тока, уровень пылегазовыбросов из печи при выплавке углеродистой стали составил 0,52–0,97 кг/т. Газы содержали 35–50 % CO, 8,2–9,4 % CO₂, 0,4 % O₂, 0,0003 % SO₂, 0,0002 – 0,0003 % NO_x и N₂ остальное. При выходе из отверстия в своде печные газы догорали, и содержание CO снизилось до 0,5–0,8 %. В табл. 14 приведена техническая характеристика дуговых печей постоянного тока.

Техническая характеристика ДППТ для плавки стали и чугуна

Наименование параметров	Ед. измерения	Тип печи			
		ДППТ-06	ДППТ-6	ДППТ-12	ДППТ-25
1. Номинальная емкость	т	0,6	6,0	12,0	25,0
2. Макс, активная мощность	кВт	600	4000	8000	16000
3. Сводовой электрод	шт.	I	I	I	I
4. Диаметр графитирован электрода	мм	150	200	250	400
5. Время расплавления	час	0,9	0,9	0,9	0,9
6. Удельный расход э/энергии на расплав	кВт · ч/т	500	470	460	435
7. Удельный расход граф. электродов	кг/т	1,5	1,5	1,5	1,5
8. Напряжение питающей сети	кВт	6,0	6,0	6,0	6,0

4.11. Индукционные плавильные агрегаты

4.11.1. Эффективность процессов плавки

Основными типами индукционных печей, применяемых в чугунолитейном производстве, являются:

- тигельные – для плавки и миксерования;
- канальные – только для миксерования;
- специальные печи – для особых случаев.

Для плавки твердой шихты применяются индукционные тигельные печи повышенной (более 1000 Гц), средней частоты (150–500 Гц) и промышленной частоты (50–60 Гц). В чугунолитейном производстве индукционные печи повышенной частоты применяются редко (в специализированных производствах).

В процессе плавки при переключении ступеней, изменении количества или состояния металла в тигле, разгаре футеровки происходит изменение индуктивности плавильного контура, что снижает электрический КПД печи. В целях максимального повышения КПД необходимо поддерживать $\cos \varphi$ плавильной установки близким к 1. Это достигается включением или выключением (вручную или автоматически) дополнительных емкостей конденсаторов.

Для выдержки и подогрева жидкого металла, полученного в другом плавильном агрегате, применяются индукционные каналь-

ные миксеры. По принципу действия они основаны на использовании тока короткого замыкания; трансформатор индукционной единицы исполнен так, что петля жидкого металла является вторичной короткозамкнутой обмоткой, разогревающейся при пропускании тока. Во избежание разрыва цепи вторичной обмотки в печи постоянно должно находиться некоторое количество металла («болото»). Поскольку мощность индукционной единицы ограничена огнеупорностью футеровки, в печах с большой вместимостью ванны устанавливают несколько индукционных единиц. Индукционные каналные печи имеют КПД 75–80 % и более совершенны для миксирования, чем тигельные. $\cos \varphi$ у них выше, чем у тигельных. Емкость конденсаторных батарей требуется для работы в несколько раз меньше, а расход энергии в режиме нагрева составляет около $50 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. У тигельных в режиме миксирования расход энергии составляет $50\text{--}60 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Вместимость печей, сменность, величина «болота» и продолжительность работы в течение дня, т. е. основные факторы организации производства, зависят от конкретных условий и существенно влияют на производительность и стоимость расплавления. Однако при плавке синтетического чугуна производительность даже при оптимальных условиях составляет 0,7–0,8 от паспортной и соответственно больше расход электроэнергии.

Особенностью индукционной плавки является возможность полноценного использования отходов металлообработки: тонколистовой высежки углеродистой, динамной и трансформаторной стали, чугуна и стальной стружки; в перспективе могут быть использованы металлизированные железорудные окатыши ($\text{Fe} > 90 \%$, $\text{FeO} < 2 \%$), которые обеспечивают требуемое качество выплавленного металла. Основными требованиями к металлошихте являются соответствующие вместимости печи размеры кусков шихты, соответствие и стабильность химического состава и ограниченное содержание газо- и шлакообразующих примесей.

Подготовка металлошихты к плавке зависит от вида шихты. Кусковые шихтовые материалы необходимо подогреть до $50\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$, в противном случае при погружении в жидкий металл на поверхности шихты образуется конденсационная влага и происходят взрывы с выбросами жидкого металла. При применении тонкой шихты это явление отсутствует.

Подогрев кусковой шихты может быть различным: продувкой подогретым воздухом в суточных бункерах, в специальных бадах

горелками, в камерных печах горелками или индукционными токами. Высокотемпературный подогрев повышает термический КПД плавильной печи за счет ускорения плавки (до 500 °С – на 15–20 %, до 800 °С – на 20–30 %).

Легковесные тонколистовые материалы применяются в пакетированном виде. При этом в печи недопустим шлак, так как пакеты ошлаковываются и их бывает трудно погрузить в металл и расплавить.

Для повышения содержания углерода в шихту добавляются науглероживающие добавки – карбюризаторы. Усвоение углерода повышается с уменьшением размеров частиц карбюризатора в результате увеличения поверхности контакта с жидким металлом; чрезмерно мелкие частицы уносятся конвективными потоками воздуха; оптимальный размер частиц – 3–5 мм. Время науглероживания разными карбюризаторами составляет около 20 мин. Поэтому процесс науглероживания совмещается с расплавлением шихты, для чего карбюризатор вводится под загружаемую шихту. В некоторых условиях целесообразны применение специальных науглероживающих брикетов, вдувание порошкообразного графита в расплав струей нейтрального газа. Загрузка шихты производится в определенной последовательности: карбюризатор, легковесная шихта, кусковая тяжеловесная шихта.

Процесс плавки в индукционной печи промышленной частоты состоит из нескольких этапов. В начальный период плавки, при отсутствии жидкого металла, производится наплавление его из твердой шихты. Этот процесс малопроизводителен; для его ускорения предварительно заготавливают специальный пусковой болван массой в 1/2–2/3 вместимости печи, что позволяет наплавить тигель жидкого металла в течение 8–10 ч. В дальнейшем процессе плавки применяется режим плавки на «болоте», постоянно находящемся в тигле печи; при этом из полной печи выпускается до 60 % объема наплавленного чугуна с последующей добавкой такого же количества твердой шихты. Этот режим – растворение твердой шихты в жидкой ванне – является наиболее производительным и обеспечивает максимальную скорость плавки, так как при не заполненной жидким металлом печи мощность, потребляемая печью, существенно снижается. Изменение мощности, подводимой к печи, производится переключением на соответствующую ступень вторичной обмотки питающего трансформатора; при этом меняются напряжение и сила тока на индукторе печи. Средний за месячный период работы удельный расход электроэнер-

гии на плавку чугуна в индукционных тигельных печах промышленной частоты составляет более 1100 кВт · ч/т.

Печи типа ИЧТ имеют девять ступеней напряжения вторичной обмотки (например, в печи ИЧТ-10 напряжение от 1175 до 391 В), из которых первые пять ступеней используются для плавки, остальные – для спекания тигля и миксерного режима выдержки жидкого металла. При включении печи происходит электродинамическое движение жидкого металла в тигле, тем большее, чем больше подводимая мощность. Перемешиванием обеспечивается выравнивание температуры в объеме печи, растворение частиц шихты и карбюризатора, дегазация расплава; при длительной выдержке (30–60 мин), особенно в сочетании с высокотемпературным нагревом и активным перемешиванием, содержание газов, главным образом кислорода и водорода, начинает увеличиваться.

При плавке обычных чугунов можно пренебречь угаром Mn, Si и других компонентов ввиду их малой концентрации. Если концентрация их достигает более 1 %, угар становится заметным (до 20–25 %). Общий угар в режиме плавления зависит от степени окисленности шихты. При плавке на кусковой шихте он не превышает 3 %, при выплавке синтетического чугуна из мелких отходов (стружки, высечки и т. д.) угар увеличивается до 6–7 %. Основной угар элементов, в том числе и железа, имеет место в режиме плавления.

Науглероживание следует проводить до введения в расплав ферросилиция. Умеренное перемешивание расплава и выделение CO способствуют очищению чугуна от неметаллических включений и газов.

Технико-экономические преимущества индукционных печей в сравнении с вагранкой проявляются главным образом в снижении стоимости шихты за счет использования в ней малоценных отходов типа листовой выштамповки, обрезки и т. д.

Фирмой Union Carbide Corp. проведено сравнение показателей работы водоохлаждаемой вагранки горячего дутья производительностью 30 т/ч, установки двух 20-тонных электродуговых (переменного тока) печей, а также 7 индукционных печей (промышленной частоты) емкостью по 23 т. В результате исследований было установлено, что себестоимость жидкого чугуна составляет из вагранки – 46,32 дол., электродуговой печи – 43,09 дол. и индукционной печи – 52,6 дол. за тонну.

Экономическая оценка индукционных печей по себестоимости выплавленного чугуна не однозначна, так как на экономичность плавки влияет много различных факторов. Главнейшими из них являются:

марки выплавляемого чугуна, характер литья, объем производства, уровень его организации и т. д. Если проанализировать технологическую себестоимость в разрезе элементов затрат, то одним из основных факторов экономичности индукционной плавки является возможность переплава дешевой шихты, составленной на основе отходов металлообработки, использовании возврата собственного производства и лома. Сравнение стоимости шихты для получения чугуна марки СЧ 20 в коксовых вагранках и индукционных печах показывает, что шихта синтетического чугуна дешевле по сравнению с ваграночной шихтой. По данным ГАЗ, стоимость 1 т шихты для синтетического чугуна марки СЧ 20, выплавляемого в индукционных печах промышленной частоты, в сравнении с шихтой для плавки чугуна той же марки и химсостава, выплавляемого в вагранке, на 65 % меньше.

По данным зарубежных источников, расход технологической электроэнергии на расплавление и перегрев 1 т жидкого чугуна в индукционных печах, работающих без «болота», составляет 550–600 кВт · ч. По данным отечественных предприятий, использующих индукционные печи промышленной частоты, работающие с «болотом», около 1200 кВт · ч. Эти колебания в расходе технологической электроэнергии объясняются влиянием многих факторов, таких как емкость и мощность печи, технология и организация процесса плавки, необходимость во время простоев печи поддерживать «болото» в расплавленном состоянии.

Эффективность индукционных печей для плавки чугуна подтверждается практикой эксплуатации их на многих заводах в индустриально развитых странах.

Термический КПД вагранки и электродуговой печи высок только для периода расплавления твердой шихты (50 % для вагранки и 80 % для дуговой печи). При перегреве жидкого чугуна КПД у них составляет соответственно всего лишь 5 и 20 %. В то же время термический КПД для периода перегрева в индукционной печи или миксере составляет 60–70 % – у тигельной и 88–85 % у канальной печи. Таким образом, как энергетически, так и экономически выгодны различные дуплекс-процессы.

Применение дуплекс-процесса вагранка горячего дутья – индукционный миксер позволяет до двух раз снизить расход условного топлива по сравнению с плавкой только в вагранке горячего дутья за счет более низкой температуры выпуска чугуна из печи, непрерывности плавки и более экономичного перегрева металла в миксере.

Переход от плавки чугуна в одном агрегате к дулекс-процессу «индукционная печь – индукционный миксер» (или «дуговая печь – индукционный миксер») позволяет также повысить на 10–15 % производительность плавильной установки за счет передачи функции перегрева чугуна к миксеру-копильнику. При организации плавки чугуна дулекс-процессом значительно стабилизируется температура и химсостав металла.

При плавке металла в индукционной печи санитарно-гигиенические условия труда значительно лучше, чем при плавке в вагранке.

Эффективным мероприятием для снижения расхода технологической электроэнергии при плавке чугуна в индукционных электропечах является переход на печи средней частоты, работающие без «болота».

4.11.2. Индукционные печи средней частоты

С 1975 г. все больше в мировой литейной практике используются индукционные тигельные печи средней частоты. Преимущества, достигаемые при их использовании:

- примерно в 3 раза более высокая мощность и соответственно производительность печей средней частоты по сравнению с печами промышленной частоты при равной емкости, что ведет к снижению эксплуатационных расходов и удельных капитальных затрат;

- садочный режим плавки, т. е. плавка без использования, как это делается при плавке в печах промышленной частоты, переходящего от плавки к плавке остатка жидкого металла, так называемого «болота» позволяет:

- исключить обязательную при использовании печей промышленной частоты предварительную сушку шихты и связанные с нею затраты;

- останавливать печь с полным сливом расплава на время перерывов в работе литейного отделения (выходные дни, 2 и 3-я смены, остановки производства из-за сокращения объемов заказов и др.), тем самым исключить непроизводительные затраты труда, энергии и материалов;

- осуществлять замену марок выплавляемого металла;

- сократить удельный расход электроэнергии на тонну выплавляемого металла благодаря более высокому тепловому и электрическому КПД печей средней частоты (тепловой КПД возрастает благодаря сокращению времени плавки, электрический – благодаря более высокому электросопротивлению твердой шихты);

– сократить расходы на футеровку, т. к. долговечность футеровки при садочном режиме плавки возрастает (средний срок службы футеровки печей промышленной частоты средней емкости составляет 350–400 плавов, т. е. для печи емкостью 6 т это соответствует производству до 2400 т чугуна);

– оптимизировать процесс образования центров кристаллизации благодаря короткому времени плавки и одноразовому нагреву металла.

Основными поставщиками индукционных тигельных печей средней частоты на мировом рынке являются зарубежные фирмы: Induktotherm (США), ABB Industrietechnik AG (Германия) и Yunker GMBH (Германия). В России изготовлением подобных печей занимается ОАО «РЭЛТЕК», г. Екатеринбург.

4.12. Управление плавкой с помощью плавильного процессора

Экономичность индукционных печей средней частоты зависит от встроенности их в производственный процесс, качества энергопитания и управления производственным процессом. Среднечастотные плавильные печи с плотностью мощности до 1 МВт/т обеспечивают нагрев расплавленного металла со скоростью около 50 °С/мин. Управление работой печи осуществляется процессором. К вычислительному процессору в зависимости от требования через устройства связи подключаются: взвешивающая система стоящей на тензодатчиках индукционной печи, термопара погружения, устройства, необходимые для подчиненной блокировки, спектрометр, используемый для проведения химанализа, динамик звуковой сигнализации, модем для получения изображения на мониторе, производственная система управления.

Процессор управляет мощностью печи и связанной с ней подачей энергии. Взвешивающее устройство непрерывно измеряет количество металла, находящегося в печи, или загружаемого в печь, и передает обработанный сигнал на плавильный процессор. Учитывая количество металла в печи, полученную им энергию и принимая во внимание потери, плавильный процессор рассчитывает на среднюю температуру расплава. Во время выполнения плавильной программы на мониторе дается информация: масса металла в печи, рассчитанная средняя температура расплавляемого металла, общее потребление электроэнергии расплавом, удельный расход электроэнергии, количество энергии, необходимое для доведения расплава до заданной температуры.

При передаче расплаву по ходу плавки необходимой удельной энергии плавильный процессор дает сигнал «Печь догрузить». Этот сигнал повторяется во время плавки до тех пор, пока загрузка печи не достигнет заданного значения. Затем расплавленный металл нагревается до заданной температуры, после чего плавильный процессор переводит печь в режим хранения и предлагает плавильщику произвести измерение температуры. Измеренная температура ванны высвечивается большими цифрами на мониторе и автоматически вводится в процессор для расчета энергии, необходимой для перегрева металла до заданной температуры.

После введения в расплав необходимого количества корректирующих химсостав добавок, рассчитанного процессором путем сравнения заданного химсостава металла с данными спектрометрического анализа, плавильщик нажатием клавиши включает подачу энергии.

Затем расплав одновременно с введением корректирующих добавок доводится до требуемой температуры разлива и заданного хим.состава, после чего плавильный процессор снова переводит печь в режим миксирования и предлагает плавильщику провести разлива. После разлива может быть начат следующий цикл плавки.

Для контроля состояния тигля применяются системы **INTEGRAL** и **SAVEWAY**.

Система контроля состояния тигля INTEGRAL использует такие электрические эксплуатационные характеристики, как частота и активная мощность печи, которые изменяются в зависимости от толщины стенки тигля. Она непрерывно сравнивает регистрируемые измеряемые значения с заранее определенным граничным значением и перезаписывает их. На мониторе среди прочих данных графически представлено измерение активной мощности в процентах и износ тигля во время печной компании. Благодаря этому INTEGRAL предоставляет надежную и наглядную систему оценки состояния тигля.

Система контроля состояния тигля SAVEWAY. Принцип действия системы контроля тигля SAVEWAY базируется на том, что вплотную к теплоизоляционному слою футеровки после обмазки индуктора размещают сенсорные маты, разделенные на сектора по периметру тигля, и измеряют по секторам изменение электрического сопротивления футеровочного материала. Благодаря этому регистрируется любое продвижение расплава в направлении катушки, в том числе и по небольшим трещинам. Система рассчитывает по этим данным минимальную толщину неповрежденной стенки тигля.

Система контроля состояния тигля SAVEWAY представляет собой самую информативную систему контроля состояния тигля:

- контролирует локальный износ футеровки по сегментам;
- улавливает продвижение расплава также по трещинам;
- делает возможным получение надежной информации о состоянии службы тигля;
- находит наиболее слабое место тигля.

Плавильный процессор протоколирует все события, такие как неисправность установки, предупреждения и другие сообщения о неполадках.

Применение системы контроля в подверженных опасности местах индукционных печей в сочетании с применением плавильного процессора дает коренное повышение экономичности и безопасности индукционных печей.

4.13. Энергосбережение при плавке алюминиевых сплавов

Для приготовления литейных сплавов на алюминиевой основе применяются преимущественно четыре типа плавильных печей: пламенные, электрические печи сопротивления, индукционные установки (канальные и тигельные) и дуговые печи постоянного тока.

По удельным расходам энергоресурсов на плавку одной тонны алюминиевого сплава плавильные агрегаты различаются следующим образом (табл. 15):

Таблица 15

Удельные расходы электроэнергии на плавку Ал-сплава АК9

Тип электропечей	Удельный расход электроэнергии при плавке АК9, кВт · ч/т	Удельный расход тепловой энергии, Мкал/т
ДППТ-6	380	326,8
Однофазная, двухканальная индукционная печь пром. частоты, 1,0 т	400	344,0
ИАТ-6 пром. частоты	543	467,0
Печи сопротивления САН-3	550	473,0
Отражательная, пламенная печь ванного типа, 6 т (природный газ)	90 м ³	765,0

Во всех случаях процесс выплавки качественного металла включает в себя операции плавления шихты и обработки расплава рафинирующе-дегазирующе-модифицирующими реагентами. Наиболее важное влияние на свойства отливок оказывают условия плавки в печи, а именно: равномерность нагрева садки, состав печной атмосферы и т. д. С этой точки зрения процессы плавки алюминиевых сплавов в различных плавильных агрегатах существенно отличаются.

Пламенные печи. Пламенный способ выплавки металлов основан на использовании тепла продуктов сгорания газообразного или жидкого топлива. Вследствие этого в печной атмосфере неизбежно присутствуют N_2 , CO_2 , H_2O . Из-за того, что плавление садки происходит в неглубоких, но имеющих большую поверхность ваннах, имеет место повышенный угар металла и создаются благоприятные условия для насыщения его газами. Безвозвратные потери резко возрастают с использованием легковесной садки: стружки, листовой обрезки и т. д. Неравномерность прогрева ванны в крупных печах также достаточно велика. Угар металла в пламенных печах в зависимости от вида шихты:

<u>Шихтовые материалы</u>	<u>Угар, %</u>
Чушковые материалы	1,55
Листовая обрезь.....	7,82
Стружка	8,10

Отражательные печи обладают высокой производительностью, работают на дешевых энергоносителях, просты и надежны в эксплуатации. Многие зарубежные фирмы стремятся усовершенствовать пламенные плавильные установки с целью их эффективного использования для плавки литейных сплавов в условиях ограничений в расходовании электроэнергии. В этом направлении достигнуты определенные успехи и в ряде случаев современные газопламенные печи позволяют выплавлять качественный металл при невысоком угаре. Однако эксплуатация любых пламенных печей приводит к большому загрязнению воздушного бассейна продуктами сгорания топлива.

Электрические печи сопротивления. Печи с нихромовыми (или криптоловыми) нагревателями имеют ряд преимуществ перед пламенными установками: незначительное количество нежелательных газов в печной атмосфере, невысокие потери металла, сравнительно высокий тепловой КПД. Наряду с достоинствами печам сопротивления присущ ряд значительных недостатков. Они имеют большие габариты, что обусловлено необходимостью размещения на теплоизлучающих поверхностях нагревателей с удельной мощностью более 30–40 кВт/м². Расход электроэнергии на плавку 1 т жидкого ме-

талла велик и составляет около $700 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. Нагревательные элементы имеют низкую стойкость.

По этой причине крупные печи сопротивления для нужд литейного производства не изготавливаются. Обычно емкость таких установок не превышает $1,5\text{--}2,0 \text{ т}$, и они, как правило, используются в качестве раздаточных печей у рабочих мест. При небольшом объеме производства ($\sim 1000 \text{ т}$ алюминиевых отливок в год) печи сопротивления могут успешно применяться и для плавки металла.

Индукционные печи. Индукционные печи промышленной частоты для плавки алюминия получили широкое применение в литейных цехах. Это обосновано тем, что они имеют целый ряд существенных достоинств. Так, среда, в которой ведется плавление, не содержит нежелательных газов и не обогащена парами H_2O . Безвозвратные потери металла в индукционных печах не превышают $0,8 \%$ при переплаве чушкового материала, $2,37 \%$ при использовании листовой обрезки и $3,87 \%$ при плавке стружки.

Тепловой КПД плавильных установок достаточно высок при невысоком удельном расходе электроэнергии, а электрический и температурный режимы плавки легко поддаются автоматизации.

Индукционные установки имеют различную мощность при емкости тигля до 100 т . По принципу плавления они подразделяются на печи канального и тигельного типа.

В канальных электропечах плавление садки осуществляется за счет выделения джоулева тепла в расплаве, заполняющем специальные каналы. Последние являются вторичной цепью (нагрузкой) в системе однофазного (или многофазного) трансформатора (индуктора), используемого для плавления шихты.

При таком способе нагрева металла удается сравнительно просто индуцировать значительные токи в каналах, заполненных расплавом, вследствие незначительного рассеяния магнитного потока в системе индуктор-виток жидкого металла, зашунтированной замкнутым магнитопроводом.

Канальные печи требуют систематической чистки каналов (для многих сплавов практически после одной-двух плавки). В них затруднен переход с плавки одной марки металла на другую, т. к. необходимо проведение промывных плавки. Каналы печи должны быть заполнены горячим расплавом (так называемое «болото») даже при длительных остановках для исключения возможности растрескивания

футеровки каналов (подовых камней) и предотвращения разрыва вторичного витка вследствие усадки металла при его затвердевании.

В основе работы **индукционных печей тигельного типа** также лежит трансформаторный принцип передачи энергии. Первичная обмотка (индуктор) располагается снаружи тигля. Вторичной цепью в этом случае служит непосредственно садка, загруженная в тигель. Электромагнитное взаимодействие между индуктором и садкой оказывается менее эффективным, чем у канальной печи, т. к. здесь имеет место значительное рассеяние магнитного потока из-за отсутствия замкнутого шунтирующего магнитопровода. Поэтому естественный (т. е. до компенсации) коэффициент мощности $\cos \varphi$ тигельных печей не превышает 0,1–0,17 против 0,2–0,35 для канальных. Вместе с тем тигельные печи не имеют недостатков, свойственных канальным. Тигель менее чувствителен к охлаждению, а его состояние можно визуально контролировать. Тигельную печь в любое время можно отключить и включить с холодной завалкой (при определенных размерах шихты или с «пусковым» слитком). Тигельные печи допускают быстрый переход с одной марки металла на другую, а низкий естественный $\cos \varphi$ может быть легко доведен до оптимального значения применением компенсационных емкостей-конденсаторов.

В садке индукционных печей неизбежно возникает значительная циркуляция расплава вследствие неравномерности распределения электродинамических усилий в объеме жидкого металла. Она оказывает двойное влияние на процесс плавки. Польза перемешивания заключается в ускорении плавления твердых кусков и усреднении температуры и химического состава ванны. Однако перемешивание способствует вовлечению окисных плен в глубь ванны и насыщению металла газами. Поэтому в ходе плавки следует осуществлять рациональный подвод мощности к печи: максимальный в начале и минимальный в конце.

4.14. Дуговые печи постоянного тока для плавки алюминиевых сплавов

НТФ «ЭКТА» разработан ряд дуговых печей постоянного тока нового поколения для плавки сплавов; в том числе на основе алюминия. Новые печи по основным параметрам значительно превышают уровень плавильных печей других типов. Первая промышленная плавка алюминиевых сплавов в дуговой печи постоянного тока была проведена в литейном цехе Ковровского электромеханического заво-

да в конце мая 1987 г. Была реконструирована для плавки алюминиевых сплавов плазменно-дуговая печь постоянного тока ПСП-0,6/0,7 И1. Впоследствии, после полной реконструкции, печь получила название ДППТ-0,5. С внедрением в 1988 г. двух печей ДППТ-0,5 они заменили четыре индукционные печи ИАТ-0,4, ранее работающие в цехе. Опыт эксплуатации показал, что производительность ДППТ-0,5 в 3–4 раза выше, чем ИАТ-0,4. По сравнению с индукционными печами значительно сократились затраты на ремонт футеровки и обслуживание печи. Срок службы набивной футеровки на основе жаропрочного бетона составил более 13 лет при незначительном ремонте стен сливного желоба и завалочного окна. Свод, футеруемый жаропрочным бетоном, обычно заменяется через 6–8 месяцев.

Опыт промышленной эксплуатации ДППТ-0,5 показал их значительные преимущества по сравнению с печами ИАТ-0,4 и печами сопротивления САТ-250.

Во-первых, экономичность и мобильность процесса. Печь в любой момент времени может быть включена или при необходимости остановлена. Остановка периодом процесса плавки не лимитируется. После включения холодной печи расплав может, быть получен при ограниченной максимальной мощности 200 кВт через 1,5 часа и при полной активной мощности источника электропитания 450 кВт через 0,5 часа. Это позволяет при минимальной установленной мощности и оптимальном количестве печей получать необходимое количество жидкого металла в любое время суток, сократить количество расплавленного металла в цехе, уменьшить его угар в процессе миксирования. Отсутствие «болота» позволяет легко переходить на выплавку различных марок сплавов без создания запаса жидкого металла в миксерах.

Во-вторых, малая трудоемкость и высокая производительность производства. Разовая завалка шихты и короткое время расплавления освобождают плавильщика от частых подзавалок и длительного наблюдения за режимом работы печи. Один плавильщик ведет одновременную плавку на двух ДППТ-0,5 и обрабатывает металл в десяти раздаточных печах.

В-третьих, дуговой нагрев является единственным из известных методов плавки, при котором газы и неметаллические включения удаляются в процессе расплавления алюминиевого сплава. Высокая скорость плавления, разовая завалка шихты, полный слив металла предотвращают попадание в расплав неметаллических включений из

шихты, а организованное перемешивание расплава и специальные режимы дуги диспергируют неметаллические включения в расплаве и способствуют их удалению.

В-четвертых, возможна эффективная переплавка мелкой шихты, стружки, лома алюминиевых сплавов, содержащих трудно извлекаемые детали из сплавов на основе железа, переплавка отходов с отгонкой цинка. При переплаве смешанного лома детали из сплавов на основе железа оседают на дно ванны, не успевают ассимилироваться расплавом и выгребаются из печи после слива.

В-пятых, печь обладает высокой надежностью и имеет ряд преимуществ в части техники безопасности и улучшения экологической обстановки в литейно-заливочном участке цеха. Низкий уровень пылегазовыбросов, отсутствие необходимости использования флюсов, закрытое плавильное пространство, возможность подачи инертного газа в зону горения дуги позволяют использовать простые устройства вентиляции и газоочистки. Разовая механизированная завалка шихты облегчает эксплуатацию, улучшает условия труда плавильщика и увеличивает производительность.

Исследования плавки алюминия и его сплавов в ДППТ показали высокое качество металла без дополнительной рафинирующей обработки вопреки мнению некоторых специалистов, что применение дугового нагрева может привести к локальному перегреву, повышенному угару компонентов сплавов, повышенному содержанию включений и отрицательным изменениям механических свойств. Для устранения этих негативных явлений применяются специальные технологии и режимы плавки алюминиевых сплавов в ДППТ.

В настоящее время печи ДППТ и процесс плавки в них в значительной мере усовершенствованы. НТФ «ЭКТА» поставляет сертифицированный ряд печей ДППТ для плавки сплавов на основе алюминия и меди. Предлагаемый ряд печей оснащен системами управляемого перемешивания расплава, подавления пылегазовыбросов из печного пространства, предотвращения локальных перегревов расплава, стабилизации электрического режима, автоматического управления процессом плавки и защиты основных узлов печи и источника электропитания. ДППТУ взрывобезопасны, позволяют нагревать и выдерживать расплав в интервале температур 650–1700 °С, переводить в расплав и разделять шлако-металлические съемы, использовать рядовые огнеупорные материалы, обеспечивают высокую температуру отходящих печных газов и сгорание органических соединений на выходе из печи, препятствующую образованию дыма.

Это позволяет использовать любую шихту из вторичных металлов, переплавлять шлаковые съемы с индукционных, газовых и печей сопротивления, отказаться от предварительной подготовки лома, выполнять экологические требования.

ДППТ являются принципиально новым оборудованием для плавки алюминиевых сплавов. Конструкции печных установок и энерготехнологические процессы защищены патентами Российской Федерации.

5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТЕРЖНЕЙ

В настоящее время в литейных цехах по способам отверждения применяются в основном три процесса изготовления стержней: процесс с тепловой сушкой стержней в сушилах, процесс изготовления стержней с отверждением в нагреваемой оснастке («Hot-Box») и процесс отверждения стержней за счет химических реакций («Cold-Box»).

Процесс изготовления стержней с тепловой сушкой имеет ограниченное применение, не отвечает современным техническим требованиям, предъявляемым к качеству и точности отливок, не обеспечивает стабильного качества стержней, отличается высокой трудоемкостью и тяжелыми условиями труда рабочих. Сушила неэффективно расходуют топливо, их термический КПД составляет 20–30 %.

В то же время в странах СНГ до сих пор по этому процессу изготавливается более 30 % стержней. За рубежом они используются весьма редко для решения каких-либо специальных технологических проблем, в частности в экспериментальных производствах.

Оптимальный расход топлива на сушку стержней определяется по формуле

$$B_{ct} = N_{\text{п}} / Q_{\text{н}} \eta_n \cdot [i_{ct} + (W_n - W_k) / (100 - W_k) \cdot (595 + 0,47t_c)],$$

где B_{ct} – оптимальный расход топлива на сушку стержней в данном сушиле, кг или м³ топлива на 100 кг стержней; $N_{\text{п}}$ – расход песка на изготовление 100 кг стержней, кг; $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг или м³; η_n – КПД термический сушила для стержней; i_{ct} – теплосодержание стержневой массы при температуре сушки, ккал/кг; W_n, W_k – соответственно начальное и конечное содержание влаги в стержневой массе, в %; t_c – температура уходящих из сушила дымовых газов, °С; 595 – скрытая теплота испарения влаги при 0 °С.

Процесс изготовления стержней с отверждением в нагреваемой оснастке («Hot-Box») наиболее распространен в литейных цехах с массовым и крупносерийным характером производства.

Сущность процесса: предварительно нагретый до температуры 180–300 °С стержневой ящик заполняется пескострельным или пескодувным способом специальной быстротвердеющей под действием тепла стержневой смесью. При контакте с рабочей поверхностью горячего стержневого ящика и прогреве уплотненная смесь в течение 1–3 мин отверждается непосредственно в стержневом ящике и стержни приобретают хорошие технологические свойства: высокую прочность, высокую газопроницаемость, хорошую податливость и антипригарные свойства. Процесс позволяет изготавливать стержни высокой группы сложности.

Выемка стержня из ящика, как правило, производится при образовании достаточно прочной корки, исключающей разрушение стержня. В этом случае внутренняя часть стержня доупрочняется на воздухе за счет действия аккумулированного стержнем тепла или после его окраски при подсушке.

Показателями экономической эффективности этого процесса по сравнению с процессами и оборудованием, применяемыми при тепловой сушке, являются: небольшие капитальные вложения, рост производительности труда, снижение себестоимости изготовления литых заготовок, небольшой срок окупаемости капитальных вложений. Увеличивается производительность труда, улучшается качество и геометрическая точность стержней, уменьшается масса отливок, снижается бой и брак стержней. Общий технологический цикл получения стержня сокращается с 4–5 ч до 5–10 мин, на автоматах – до 35 с. Расход энергоносителей для изготовления стержней в нагреваемой оснастке представлен в табл. 16.

Таблица 16

Расход энергоносителей для изготовления стержней в нагреваемой оснастке

Модели стержневых машин конструкции БелНИИлита	Максимальная масса стержня, кг	Расход энергоносителя		Продолжительность цикла сушки, с
		Ед. изм.	Кол-во	
4749А1Э2 вертикальный разъем оснастки	6,0	кВт/ч	15,0	18,0

Модели стержневых машин конструкции БелНИИлита	Максимальная масса стержня, кг	Расход энергоносителя		Продолжительность цикла сушки, с
		Ед. изм.	Кол-во	
4749А2Э1 горизонтальный разъем оснастки	6,0	кВт/ч	15,0	22,0
4752 А2Г1 горизонтальный	12,0	м ³ /ч	5–8	28,0
4752А2Э1 горизонтальный	12,0	кВт/ч	58,0	28,0
4753А1Г1 вертикальный	25,0	м ³ /ч	6–8	30,0
4753А1Э1 вертикальный	25,0	кВт/ч	60,0	30,0
4753А1Г3 вертикальный	30,0	м ³ /ч	12,0	30,0
4748 вертикальный	25,0	м ³ /ч	86,5	30,0
4753 А2Г1 горизонтальный	30,0	м ³ /ч	7,5	30,0
4753 А2Э1 горизонтальный	30,0	кВт/ч	60	30,0
4754 А2Г1 горизонтальный	50,0	м ³ /ч	14,0	35,0
4757А2Г1 горизонтальный	85,0	м ³ /ч	20,0	35,0
4747А2Г1 горизонтальный	50,0	м ³ /ч	17,0	35,0

Процесс изготовления стержней с отверждением в оснастке за счет химических реакций («Cold-Box», «No-Bake»). На смену «Hot-Box»-процессу с конца 70-х гг. в литейную практику широко стал внедряться «Cold-Box» – процесс отверждения стержней в стержневых ящиках без нагрева продувкой газовым катализатором. Разновидностями этого процесса являлись: «Жидкостекольный-СО₂», «Фенол-СО₂», «Фуран-СО₂», «Эпокси-СО₂», «FRS», «Be-taset», «Redset», «Cold-Box-Amin». Наиболее широкое распространение получили в США: «Cold-Box-Amin», «Эпокси-СО₂» и «Redset», в Европе: «Cold-Box-Amin», «Betaset», «FRS» и в небольших объемах другие. И в США и в Европе лидером стал процесс «Cold-Box-Amin», по которому изготавливается свыше 60 процентов всех стержней.

Он коренным образом видоизменил технологию, экономику и организацию производства стержней и создал возможность получения весьма сложных и точных отливок для машиностроения.

«Cold-Box-Amin»-процесс. Процесс разработан в США в 1968 г. фирмой ASHLAND. Стержневая смесь содержит (мас. частей): кварцевый песок – 100; фенольную смолу (1-я часть связующего) – 0,8; полиизоцианат (2-я часть связующего) – 0,8.

После уплотнения смеси в стержневом ящике пескоструйным или пескострельным способом стержень продувается смесью паров высо-

колетучей жидкости – третичного амина (триэтиламин, диметилэтиламин) с воздухом и смесь приобретает высокую прочность – 12–15 кг/см², что составляет примерно 60 % конечного значения прочности. Время продувки составляет 2–5 с, далее в течение 10–20 с стержень продувают воздухом для очистки от паров амина. В результате взаимодействия компонентов связующего в присутствии катализатора – амина образуется твердый полимер – полиуретан, который и обеспечивает высокую прочность стержня. Для подготовки, дозирования и подачи амина применяются специальные газогенераторы, которые испаряют амин, смешивают его с воздухом и подают в стержневой ящик. Живучесть смеси составляет в зависимости от ряда факторов от 2 до 4 ч. Смесь амина с воздухом после прохода через стержневой ящик направляется в нейтрализатор (мокрый скруббер), где полностью нейтрализуется разбавленной серной кислотой с образованием водорастворимой соли сульфата аммония. Степень очистки воздуха в этой системе близка к 100 %.

По сравнению с процессами производства стержней в нагреваемой оснастке или с тепловой сушкой «Cold-Vox-Amin»-процесс имеет следующие преимущества:

- уменьшение затрат в литейном производстве за счет:
 - 1) прекращения расхода энергоносителей на отверждение стержней;
 - 2) снижения брака стержней;
 - 3) повышения производительности стержневых машин;
 - 4) снижения затрат на изготовление и ремонт оснастки, возможности изготовления оснастки из пластмасс, дерева, алюминия взамен стали и чугуна;
 - 5) экономии металла за счет снижения припусков;
 - 6) снижения затрат на ремонт оборудования;
- повышение точности стержней и отливок вследствие отсутствия термических напряжений, деформаций и коробления стержней при их извлечении из оснастки и хранении;
- возможность применения для стержней сложной конфигурации с тонкими ажурными сечениями, в том числе для изготовления моноблоков стержней. Так, например, сложные наборы комплектов стержней для отливки блоков цилиндров двигателя легкового автомобиля имеют отклонения от чертежных размеров не более 0,3 мм. Некоторые виды отливок для современных двигателей невозможно изготовить без применения холодного процесса;

- высокое качество литых поверхностей деталей;
- коренное облегчение условий труда в стержневых отделениях литейных цехов, улучшение экологической ситуации в литейных цехах и вокруг них;
- возможность автоматизации изготовления стержней и простановки их в форму.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, основными направлениями снижения расхода энергоносителей в литейном производстве можно считать следующие:

1. Снижение металлоемкости отливок и их производства за счет повышения точности, уточнения стенок и ребер, уменьшения формовочных уклонов, совершенствования технологии формовки и систем питания отливок при заливке и затвердевании. Это направление позволит получить эффект не только в снижении расхода энергоносителей, но также в снижении других материальных затрат.

2. Переход на дуговые печи постоянного тока типа ДППТ путем модернизации дуговых электроплавильных печей, работающих на переменном токе, или установка новых печей. Снижение удельного расхода электроэнергии на 1 т выплавленного металла до 20 %. Снижение расхода электроэнергии на очистку отходящих газов.

3. Замена индукционных, тигельных электроплавильных печей промышленной частоты типа ИСТ, ИЧМ и др. на индукционные, тигельные печи средней частоты. Снижение удельного расхода электроэнергии на 1 т выплавленного металла в 2 раза.

4. Переход с технологии изготовления стержней с тепловой сушкой или в нагреваемой оснастке («Hot-Box») на технологию изготовления стержней в холодных ящиках («Cold-Box-Amin») с заменой или модернизацией стержневых машин.

Многократное снижение расхода электроэнергии на изготовление стержней. Повышение качества. Улучшение экологии.

5. Модернизация коксовых вагранок с переводом их на газовое топливо. Повышение качества металла, сокращение затрат на решение экологических проблем и на основные материалы. Срок окупаемости – до одного года.

6. Снижение расхода на формовку отливок сжатого воздуха за счет применения формовки из холоднотвердеющих смесей по процессу «No-Vac».

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин, В. И. Энергосбережение : учеб. пособие по курсу «Энергосбережение и энергетический менеджмент» для студентов / В. И. Володин. – Минск : БГТУ, 2001. – 162 с.
2. Вторичные теплоэнергоресурсы и охрана окружающей среды / В. В. Харитонов [и др.] ; под ред. В. В. Харитонова. – Минск : Выш. шк., 1988.
3. Государственная научно-техническая программа «Энергосбережение». – Минск, 1996.
4. Закон Республики Беларусь об энергосбережении // Энергоэффективность. – 1998. – № 7.
5. Кузнецов, Б. В. Расчеты экономии электроэнергии / Б. В. Кузнецов. – Минск : Беларусь, 1993. – 79 с.
6. Основные методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов. – Москва : Энергоиздат, 1987.
7. Поспелова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Поспелова. – Минск : Технопринт, 2000.
8. Основы энергосбережения : курс лекций / под ред. Н. Г. Хутской. – Минск : Технология, 1999. – 100 с.
9. Пути снижения расхода энергетических ресурсов в литейном производстве : инструктив. техн. материал. – Москва : ИТЦМ «Металлург», 2001.

Содержание

Предисловие	3
1. Основы энергосбережения	4
1.1. Энергетический менеджмент – часть общего менеджмента	4
1.2. Структура и функции энергетического менеджмента.....	7
2. Энергетические ресурсы и их потребление	10
2.1. Основные понятия.....	10
2.2. Основные энергоэкономические показатели	12
2.3. Краткая характеристика энергетического сектора экономики Республики Беларусь.....	15
3. Вопросы экологии	17
3.1. Экологические эффекты энергосбережения.....	17
3.2. Местные виды топлива.....	21
3.3. Вторичные энергетические ресурсы	25
3.3.1. Основные показатели использования ВЭР.....	26
3.3.2. Классификация ВЭР	27
4. Энергосбережение в литейном производстве.....	31
4.1. Краткая характеристика состояния вопроса	31
4.2. Характеристика процессов плавки чугуна, критерии выбора плавильных агрегатов.....	32
4.3. Рекомендации к выбору плавильных агрегатов чугунолитейного производства	39
4.4. Некоторые аспекты эффективности интенсификации процесса плавки чугуна в вагранках	41
4.5. Эффективность электроплавки с использованием ЭДП.....	46
4.6. Нарращивание массы плавки как способ повышения энергоэффективности процесса.....	47
4.7. Применение газообразного кислорода	49
4.8. Работа ДСП в рациональных режимах	50
4.9. Интенсификация процессов плавки.....	56
4.10. Повышение энергоэффективности плавки с использованием электродуговых печей постоянного тока	61
4.11. Индукционные плавильные агрегаты	66
4.11.1. Эффективность процессов плавки	66
4.11.2. Индукционные печи средней частоты	71
4.12. Управление плавкой с помощью плавильного процессора.....	72
4.13. Энергосбережение при плавке алюминиевых сплавов.....	74
4.14. Дуговые печи постоянного тока для плавки алюминиевых сплавов.....	77
5. Энергосбережение при изготовлении стержней	80
6. Основные выводы.....	84
Литература.....	85

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Одарченко Игорь Борисович
Русая Людмила Николаевна

ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Курс лекций
для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 29.12.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 5,37.

Изд. № 192.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.