The image features a photograph of a large industrial building with a corrugated metal facade and various pipes and structures. A bright yellow lightning bolt graphic strikes the top of the building. The background is a dark, textured gradient. At the bottom, there is a large red arrow pointing to the right.

В. Н. Романюк, В. Н. Радкевич, Я. Н. Ковалев

**ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОГО ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
ДОРВЖНОЙ ОТРАСЛИ**

**ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОГО
ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ ДОРОЖНОЙ
ОТРАСЛИ**

Под редакцией доктора технических наук, проф. Я.Н. Ковалева

Минск
УП «Технопринт»
2001

УДК ~~620.9.004.18:625(075.9)~~

ББК ~~31.19я75~~

P69

Романюк В.Н.

P69 Основы эффективного энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли/ В. Н. Романюк, В. Н. Радкевич, Я. Н. Ковалев; Под ред. Я.Н. Ковалева. — Мн.: — УП «Технопринт», 2001. — 292 с.

ISBN 985-464-118-X.

Энергосбережение является ключевой энергетической проблемой современности, чрезвычайно актуальной для Республики Беларусь (РБ). Показана проблема обеспечения энергоресурсами РБ и её промышленных потребителей энергии.

Эффективному энергообеспечению конкретной теплотехнологии, независимо от ее степени энергосбережения, на примере производственных предприятий дорожной отрасли посвящена данная работа. Под этим углом изложены необходимые теоретические основы энергосбережения, методы энергетического обследования и повышения эффективности энергоиспользования теплотехнологических производств, вопросы управления энергоиспользованием, экологические аспекты энергосбережения, возобновляемые и нетрадиционные источники энергии.

Книга предназначена для слушателей системы повышения квалификации инженерно-технических работников дорожной отрасли, может быть учебным пособием для студентов высших учебных заведений соответствующих специальностей.

УДК 620.9.004.18:625(075.9)

ББК 31.19я75

ISBN 985-464-118-X

© В. Н. Романюк, В. Н. Радкевич, Я. Н. Ковалев, 2001

© Оформление. УП «Технопринт», 2001

Содержание

Предисловие.....	5
Введение.....	10
1. Топливо-энергетический комплекс.....	17
1.1. Анализ топливо-энергетического комплекса Республики Беларусь.....	18
1.2. Энергетическая политика Республики Беларусь.....	27
1.3. Обеспечение энергоресурсами Республики Беларусь.....	37
1.4. Структура промышленного энергопотребления.....	43
2. Управление энергоиспользованием на производственном предприятии.....	48
2.1. Общие сведения.....	48
2.2. Вопросы энергетического управления.....	50
2.3. Энергетическое обследование предприятия.....	62
3. Теоретические основы энергосбережения.....	66
3.1. Общие положения.....	66
3.2. Энергетический баланс и энергетические характеристики.....	69
3.3. Эксергетический баланс и эксергетические характеристики.....	78
3.4. Эксергетические характеристики и структура технической системы.....	94
3.5. Иерархические уровни энергетического обеспечения технических систем.....	104
4. Снижение энергопотребления в дорожном строительстве и при производстве железобетонных изделий.....	111
4.1. Производство железобетонных изделий.....	111
4.2. Снижение энергопотребления в дорожном строительстве.....	120
4.2.1. Общие положения.....	120
4.2.2. Энергопотребление при транспортировании дорожной продукции.....	122
4.2.3. Энергопотребление строительного процесса.....	124
4.2.4. Энергопотребление ремонта и содержания дорог.....	131
4.2.5. Энергопотребление производственных предприятий по выпуску основных дорожно-строительных материалов.....	132
5. Повышение эффективности использования энергии в теплотехнологических системах.....	136
5.1. Общие сведения.....	136
5.2. Использование тепловых насосов.....	138
5.2. Рекомпрессия пара, использование пароструйных компрессоров.....	146
5.3. Аккумулирование энергии.....	150
5.4. Энерготехнологическое комбинирование.....	154
5.4.1. Мини-ТЭЦ.....	158
5.4.2. Высокотемпературные надстройки теплотехнологических процессов.....	165
6. Повышение эффективности использования электрической энергии.....	170
6.1. Рациональное использование электроэнергии в промышленности.....	170

6.2. Энергетические расходные характеристики приемников и потребителей электроэнергии	174
6.3. Основы рационального использования электродвигателей.....	180
6.4. Насосные установки	189
6.5. Вентиляционные установки	194
6.6. Производство сжатого воздуха	197
6.7. Электросварочные установки.....	208
6.8. Электрическое освещение	219
6.9. Влияние напряжения сети на электропотребление.....	226
6.10. Снижение потерь мощности и электроэнергии в системах электроснабжения.....	231
7. Энергоэффективное обеспечение теплотехнологических процессов предприятий дорожной отрасли.....	238
7.1. Производство асфальтобетонных смесей	238
7.2. Энергообеспечение производства железобетонных изделий	259
8. Экологические аспекты энергосбережения	262
9. Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии.....	272
Заключение.....	288
Литература.....	290

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема энергообеспечения считается во всем мире одной из самых приоритетных. Энергосбережение является важнейшей ее составляющей, которой в промышленно развитых странах уделяется самое серьезное внимание в рамках общенациональных задач. За последнее время в этих странах заметно снижена энергоемкость валового продукта.

В Республике Беларусь эта проблема имеет особую остроту, что связано с двумя обстоятельствами: острым дефиците собственных первичных энергоресурсов и энергоемкостью производимой продукции. Последняя почти в два раза выше, чем на аналогичных предприятиях Западной Европы.

Большинство производственных предприятий, включая и дорожную отрасль, пока не имеет рациональной системы энергоиспользования, что обуславливает перерасход энергоресурсов на 4-10¹%, что жизненно необходимо ликвидировать в ближайшее время.

Основные причины столь сложной ситуации связаны, прежде всего, с низким уровнем проектных решений производственных предприятий в части энергоиспользования. Ситуацию осложняет недогруженность оборудования, нарушение режимов его работы, неудовлетворительное содержание энергетического хозяйства, непродуманность, с точки зрения энергопотребления, всего технологического процесса, неэффективный контроль потребления тех или иных энергоресурсов, наконец, отсутствие кадров с должной энергетической подготовкой.

В 1997 году была разработана и утверждена правительством Государственная программа «Дороги Беларуси». Одним из главных блоков научно-технического обеспечения этой программы является энергосбережение в дорожной отрасли. Наибольший вклад в решение указанной отраслевой проблемы должно дать повышение эффективности энергопотребления на производственных предприятиях отрасли, к которым относятся асфальтобетонные заводы и заводы железобетонных изделий. С целью решения указанной задачи на производственных предприятиях необходимо проведение энергетических обследований, аудитов, которые послужат основой для разработки и внедрения энерготехнологических паспортов предприятий. Последние

должны стать основным исходным документом для лицензирования технологического процесса выпускаемой продукции со строго фиксируемым показателем энергопотребления на каждую операцию. Настоящая работа является введением в рассматриваемую проблему и преследует цель ознакомить с ней широкий круг специалистов дорожной отрасли.

Рациональное использование всех видов энергоресурсов в производственных процессах различных отраслей народного хозяйства, в том числе и дорожной, наряду со специфическими особенностями, имеет и общие закономерности преобразования энергии одного вида в другой. При этом существует тесная взаимосвязь промышленных объектов с системами энергообеспечения и окружающей средой. Добиться ощутимого эффекта в энергосбережении можно лишь на основе системного подхода ко всему производственному комплексу, совместными усилиями специалистов разного профиля, обладающими знаниями не только по своей специальности, но и по основам эффективного энергоиспользования.

Особую актуальность вопросы рационального использования топлива и энергии приобретают в странах, не обладающих в требуемых объемах собственными запасами органического топлива: нефти, угля, природного газа и т. п. Это обуславливается тем, что энергетическая составляющая существенно влияет на себестоимость продукции, а в энергоемких производствах доминирует в ее структуре. Стоимость потребленных энергоресурсов сказывается на конкурентоспособности продукции, прибыли и рентабельности предприятий и, в конечном счете, на состоянии экономики страны. Таким образом, вопросы энергосбережения важны не только для отдельных предприятий, но и для государства в целом. Тем более, что органическое топливо используется не только в энергетических целях, но и является ценным сырьем для химической промышленности. Запасы органического топлива ограничены и не возобновляются. В связи с этим рациональное использование органических энергоресурсов на современном этапе развития мировой цивилизации является одной из наиболее актуальных научно-технических задач.

Цель данной книги — оказать помощь работникам производственных предприятий дорожной отрасли в организации рационального использования энергоресурсов в процессе производства. Книга может быть полезна энергетикам промышлен-

ных предприятий, вне зависимости от их ведомственной принадлежности, а также студентам дорожно-строительных и энергетических специальностей.

При написании пособия авторы стремились изложить вопросы энергосбережения систематизированно, последовательно и доступно, сопровождая теоретический материал поясняющими иллюстрациями и концентрацией внимания на отдельных прикладных аспектах транспортного материаловедения, используя свой опыт научной и педагогической работы в Белорусской государственной политехнической академии.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: директору Белорусского теплоэнергетического института, к. т. н. Ф. И. Молочко, сотрудникам Комитета по автомобильным дорогам министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь Ю. Б. Барковскому и П. П. Марусенкову за внимательное прочтение рукописи книги и ценные замечания, способствовавшие ее улучшению.

Принятые сокращения

АБЗ —	асфальтобетонный завод	ЛМГ —	лигносульфонаты техниче- ские модифицированные
АБС —	асфальтобетонная смесь		галитовым отходом
АИН —	автономный инвертор на- пряжения	ЛЭП —	линия электропередачи
ВВП —	внутренний валовой продукт	МЗ —	минеральный наполнитель
ВИЭ —	возобновляемый источник энергии	МО —	модель окружения
ВО —	внешний объект	МП —	минеральный порошок
ВЭР —	вторичный энергоресурс	МТЭЦ —	мини- и микро-ТЭЦ
ВЭУ —	ветроэнергетическая уста- новка	Н —	насос
Г —	генератор	НПЗ —	нефтеперерабатывающий завод
ГД —	газовый двигатель	ОВГ —	охладитель выхлопных га- зов
ГРС —	газораспределительная стан- ция	ОС —	окружающая среда
ГТУ —	газотурбинная установка	ПАВ —	поверхностно-активные ве- щества
ДВС —	двигатель внутреннего сго- рания	ПГС —	песчано-гравийная смесь
ДГРТ —	двигатель с газообразным ра- бочим телом	ПП —	пароперегреватель
Д _р —	дрессельное местное гидрав- лическое сопротивление	ПРА —	пускорегулирующий аппа- рат
ЖБИ —	железобетонное изделие	ПСУ —	паросиловая установка
ЗЖБИ —	завод железобетонных изде- лий	ПТ —	паровая турбина
И —	испаритель	РДВС —	радиатор ДВС
ИП —	источник питания	СА —	сушильный агент
К —	компрессор	СБ —	сушильный барабан
К _д —	конденсатор	СУВ —	система управления выпря- мителем
КА —	котлоагрегат	СУИ —	система управления инвер- тором
КЗ —	короткое замыкание	СЭС —	система электроснабжения
КПД —	коэффициент полезного дей- ствия	ТБО —	твердые бытовые отходы

КПД _е —	коэффициент полезного действия эксергетический	ТДС —	термодинамическая система
КЭС —	конденсационная тепловая электростанция	ТНУ —	теплонасосная установка
ТП —	тепловой потребитель	УВ —	управляемый выпрямитель
ТС —	техническая система	ХИТ —	химический интенсификатор твердения
ТЭК —	топливно-энергетический комплекс	ЭА —	эксергетический анализ
ТЭС —	тепловая электростанция	ЭГГУ —	газотурбинная электростанция
ТЭСПП —	теплоэнергетическая система промышленного предприятия	ЭО —	энергетическое обследование
ТЭЦ —	теплоэлектроцентраль	ЭУ —	энергетическая установка

Введение

Энергия во все времена являлась ресурсом, необходимым для производства. Неоправданно низкие цены на первичные энергоносители, имевшие место в мире, сформировали расточительное, в большинстве случаев, отношение к ее использованию. В настоящее время стоимость энергии стала одной из главных составляющих производственных затрат.

В результате стала иной, как структура себестоимости, так и ее величина, изменился спрос на продукцию и услуги. Необходимость обеспечения достойного уровня жизни людей очевидна и потому рассматриваемая проблема заслуживает особого внимания. Совокупностью всего изложенного объясняется та роль, которую в последние десятилетия отводят эффективному использованию энергии все технически развитые страны.

Энергосбережение и повышение энергоэффективности обеспечения всех сторон деятельности дает целый ряд преимуществ: снижение себестоимости и, как следствие, повышение конкурентоспособности продукции, что увеличивает для предприятия вероятность "выжить", дает дополнительные средства для развития, наконец, позволяет повысить занятость населения.

Энергетические превращения являются определяющими доминантами существования любой системы. Результатом этих превращений, как следствия жизнедеятельности различных систем, является, в конечном итоге, рассеяние энергии в окружающей среде. Величина упомянутого рассеяния энергии, в зависимости от многих факторов, для одной и той же системы, прежде всего технической, может быть различной. Данное обстоятельство далеко не безразлично для нашего сообщества, поскольку запасы энергии на Земле, в формах удобных для обеспечения жизнедеятельности человека, распределены неравномерно по территории и, ко всему, достаточно ограничены (таблица В.1). Созданы они в течение очень длительного периода в результате превращений энергии Солнца, поскольку именно Солнце является единственным источником энергии на Земле. Несмотря на колоссальную величину потока энергии Солнца на Землю ($\approx 27 \cdot 10^{14}$ ГДж/год при общем годовом потреблении энергии всеми странами Земли $26 \cdot 10^{10}$ ГДж/год), ее непосредственное использование затруднено по

ряду причин и, прежде всего, из-за низкой плотности потока энергии Солнца, т.е. из-за малой величины энергии, попадающей на единицу земной поверхности ($\approx 0,17$ кДж/($m^2 \cdot c$)). Для получения от Солнца требуемого количества энергии необходимо использовать либо большую территорию, либо длительный период времени. И то, и другое неприемлемо, что объясняет исключительное значение, накопленных природой за время существования Земли, энергоресурсов (по понятным причинам эти запасы являются не возобновляемыми) в виде залежей угля, нефти, газа и пр., смотри таблицу В.1.

Таблица В.1.

Мировые запасы органического топлива

Виды запасов органического топлива	Запасы органического топлива		Прогноз времени полного использования, лет
	ГДж	миллионы тонн условного топлива	
Геологические	$(36-43) \cdot 10^{13}$	$(12-14) \cdot 10^6$	$(5-10) \cdot 10^2$
Достоверные (разведанные)	$(18-22) \cdot 10^{13}$	$(6-7) \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^2$
Готовые к использованию в современных условиях	$(9-11) \cdot 10^{13}$	$(3-3,5) \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^2$

Острота проблемы снижения потребления особенно актуальна в наши дни, когда объемы энергопотребления достигли колоссальных размеров, рис. В.1.

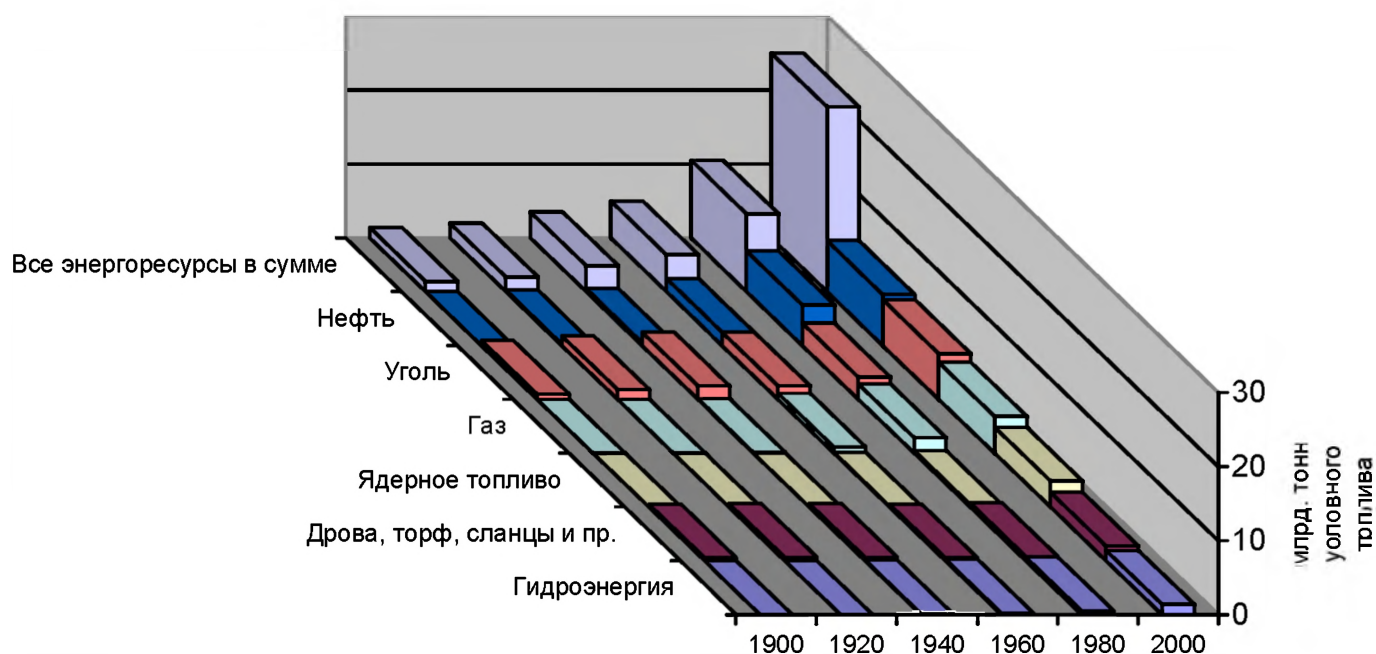


Рис.В.1. Изменение мирового потребления энергоресурсов

Быстрый рост потребления энергоресурсов вызывается непрерывным увеличением мирового промышленного производства (рис.В.2).

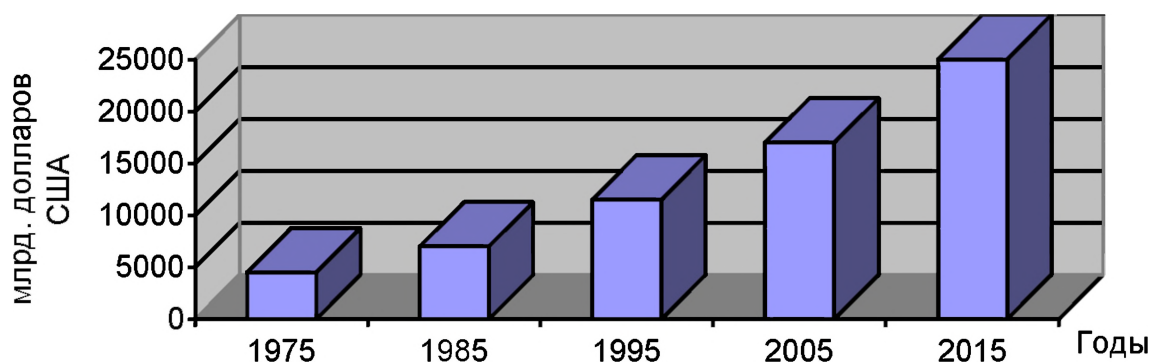


Рис.В.2. Рост мирового промышленного производства

В этой связи угроза полного использования невозобновляемых источников энергии стала ощутимой и реальной, а неравномерность их распространения по территории Земли во многом определяет экономическое благополучие стран и регионов. При этом имеет место крайне неравномерное потребление энергии различными странами и отмечается тенденция дальнейшего увеличения неравномерности потребления энергоресурсов.

Сегодня 30% населения Земли потребляет 90% всей энергии, импортируя ее в свои страны, поскольку, в основном, основные запасы энергоресурсов сосредоточены вне их территорий. Таким образом, в современном состоянии энергетика, кроме технической стороны, приобретает все большее социально-политическое значение. Отличительной особенностью последнего является наличие сильных обратных связей между объемами потребляемой энергии, уровнем жизни, развитием культуры, развитием страны, демографическими факторами и т.п. (рис.В.3).

Важным аспектом современной энергетики является биосферическая проблема, поскольку использование энергии оказывает ощутимое влияние на экологию регионов, а потому и в этом отношении, имеет жизненное значение.

Структура мирового потребления энергоресурсов (рис.В.3.) такова, что проблема транспортировки энергоресурсов всех видов сохранит свою значимость на обозримую перспективу. Перевозка высококалорийного угля морским и железнодорожным транспортом, перекачка нефти и газа по трубопроводам в ряде случаев оказывается предпочтительнее передачи электроэнергии на расстояние.

Изложенное выше позволяет понять, почему дальнейшее развитие энергетики прежним путем, когда акцент делался на высокие темпы роста производства топливно-энергетических ресурсов, встречает серьезные возражения экономического, технического, экологического характера.

Другой характерной чертой промышленного производства можно отметить существенные затраты энергии сверх теоретически необходимых, практически во всех отраслях, где, собственно, и происходит конечное использование энергии. По историческим причинам формирования сферы материального производства, особенностям технологии реализации услуг энергетики, конечное использование энергии осуществляется специалистами далекими от энергетики, что объясняет здесь крайне низкий КПД использования первичной энергии, во многих случаях не превышающий значения 10%.

Энергосбережение является ключевой энергетической проблемой современности для всего мира. В Республике Беларусь проблема эффективного энергоиспользования имеет особое звучание, что объясняется рядом объективных и субъективных факторов:

- обеспеченность собственными энергоресурсами на 10%;
- развитая промышленность, структура которой, что сложилось исторически в период энергетического изобилия, не учитывает дефицит энергоресурсов в стране;
- устаревшее, нерациональное энергообеспечение существующих технологий;
- изжившие себя, в принципе, технологии;
- дисгармония в структуре и подготовке специалистов, определяющих характер энергопотребления и пр.

В Республике Беларусь много делается для изменения сложной энергетической ситуации. В последнее время выполнена первая программа по энергосбережению на период 1996 - 2000 года. Главное ее достижение в координации усилий на уровне республики для повышения организационных и технических вопросов повышения эффективности использования энергоресурсов. Первые результаты в сохранении объемов потребления первичных энергоресурсов при приросте объема промышленной продукции, в последние несколько лет, порядка 8%. В республике создана струк-

тура управления энергосбережением, законодательная база энергосбережения, финансово-экономические механизмы энергосбережения.

Минстройархитектуры, к которому относится дорожная отрасль, согласно Республиканской программы энергосбережения, до 2005 года потенциал энергосбережения оценен в 380 тыс. тонн условного топлива. Производственные предприятия дорожной отрасли, прежде всего асфальтобетонные заводы (АБЗ) и заводы железобетонных изделий (ЗЖБИ), полностью подпадают под приведенную выше характеристику промышленного производства. И хотя, с одной стороны, их продукция отличается сравнительно невысокой, относительно других материалов, энергоемкостью (рис.В.4), ситуация с энергопотреблением при производстве соответствующих материалов и изделий во многих случаях оставляет желать лучшего. С другой стороны, продукция АБЗ и ЗЖБИ носит крупнотоннажный характер. В сочетании с тем, что отечественные заводы в сравнении с аналогичными предприятиями технически передовых стран расходуют в два раза больше энергоресурсов на выпуск подобной продукции, последнее обстоятельство придает энергопотреблению при производстве асфальтобетонной смеси (АБС) и железобетонных изделий (ЖБИ) намного больший вес, чем обозначенный на диаграмме рис.В.4. Как энергопотребители, предприятия дорожной отрасли отличаются тем, что в приходной части их энергобаланса доминирует топливная составляющая.

Указанное обстоятельство объясняет направленность данного пособия на рассмотрение, прежде всего, особенностей энергообеспечения теплотехнологий, связанных с тепловой формой энергопотребления. Изменение ситуации с энергопотреблением на АБЗ и ЗЖБИ связано с принципиальным изменением качества использования топлива, прежде всего, на основе учета положений второго закона термодинамики. Данное пособие посвящено первоначальному рассмотрению проблемы энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли. Его структура во многом вытекает из специфики производства, а также из цепи энергопревращений, обеспечивающих жизнедеятельность общества, что можно показать с помощью рис. В.5.

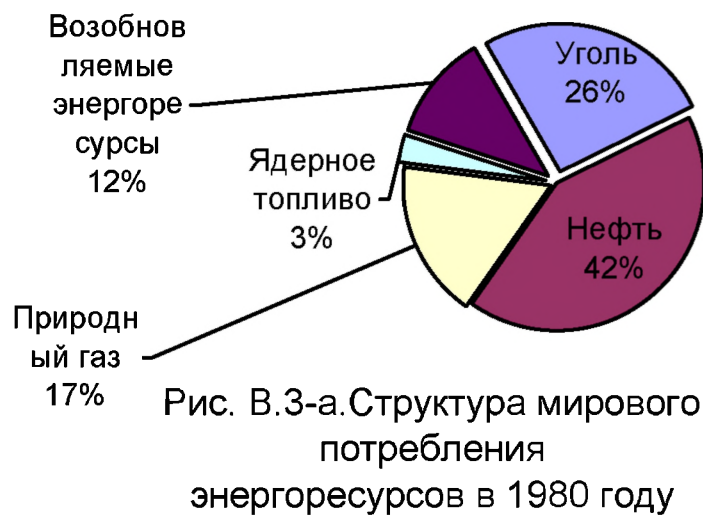


Рис. В.3-а. Структура мирового потребления энергоресурсов в 1980 году

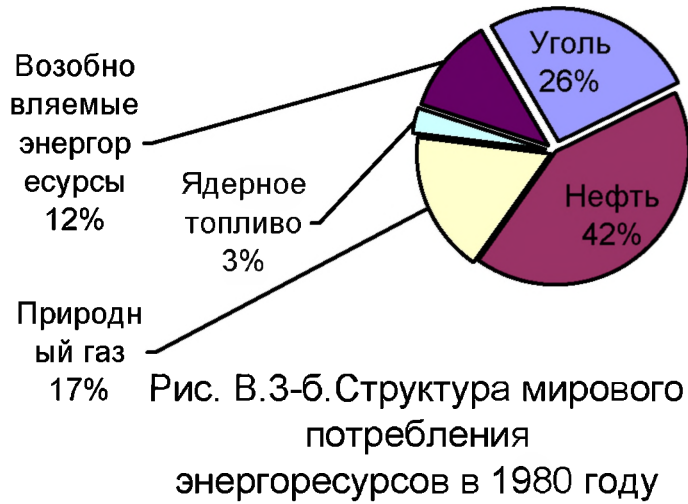


Рис. В.3-б. Структура мирового потребления энергоресурсов в 1980 году

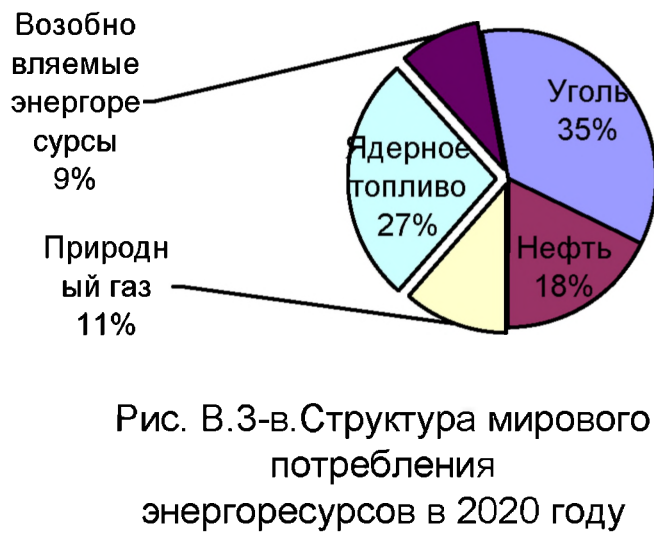


Рис. В.3-в. Структура мирового потребления энергоресурсов в 2020 году



Рис.В.4. Сравнительная энергоёмкость различных процессов и материалов

ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА

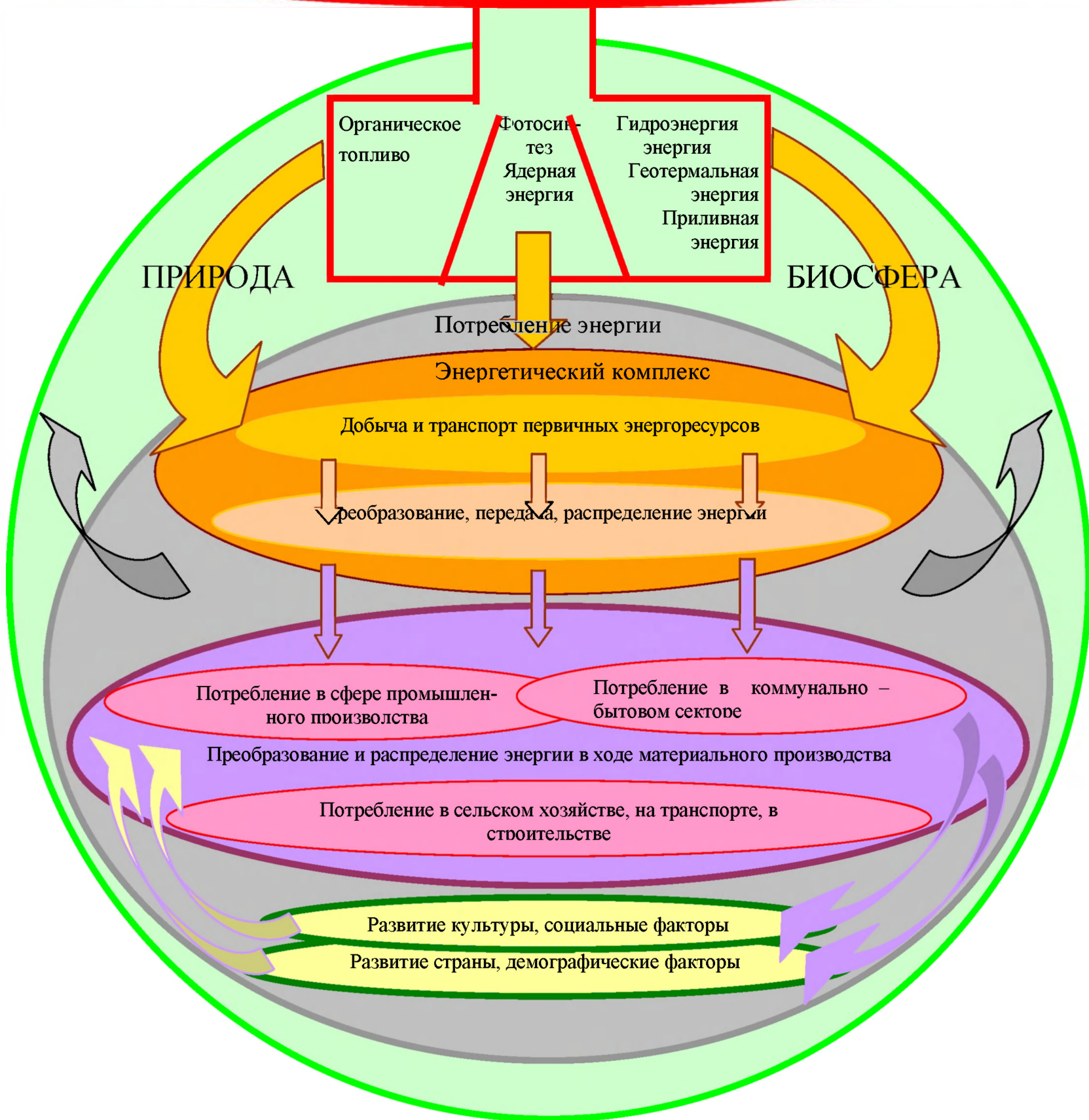


Рис. В.5. Схема энергопревращений в различных сферах, их влияние и взаимосвязь

1. Топливо-энергетический комплекс

«Топливо-энергетический комплекс» (ТЭК) - термин несколько устаревший. Как считал академик Мелентьев, являвшийся одним из ведущих системных специалистов-энергетиков, более правильно использовать определение «энергетический комплекс». Независимо от определения следует понимать, что данный комплекс во многом определяет практически все стороны деятельности любого региона, любой страны. Энергетика и, в частности, промышленная теплоэнергетика играет решающую роль в развитии материального производства.

Принципиальная схема превращений энергии в сфере материального производства может быть представлена в виде (рис.1.1).

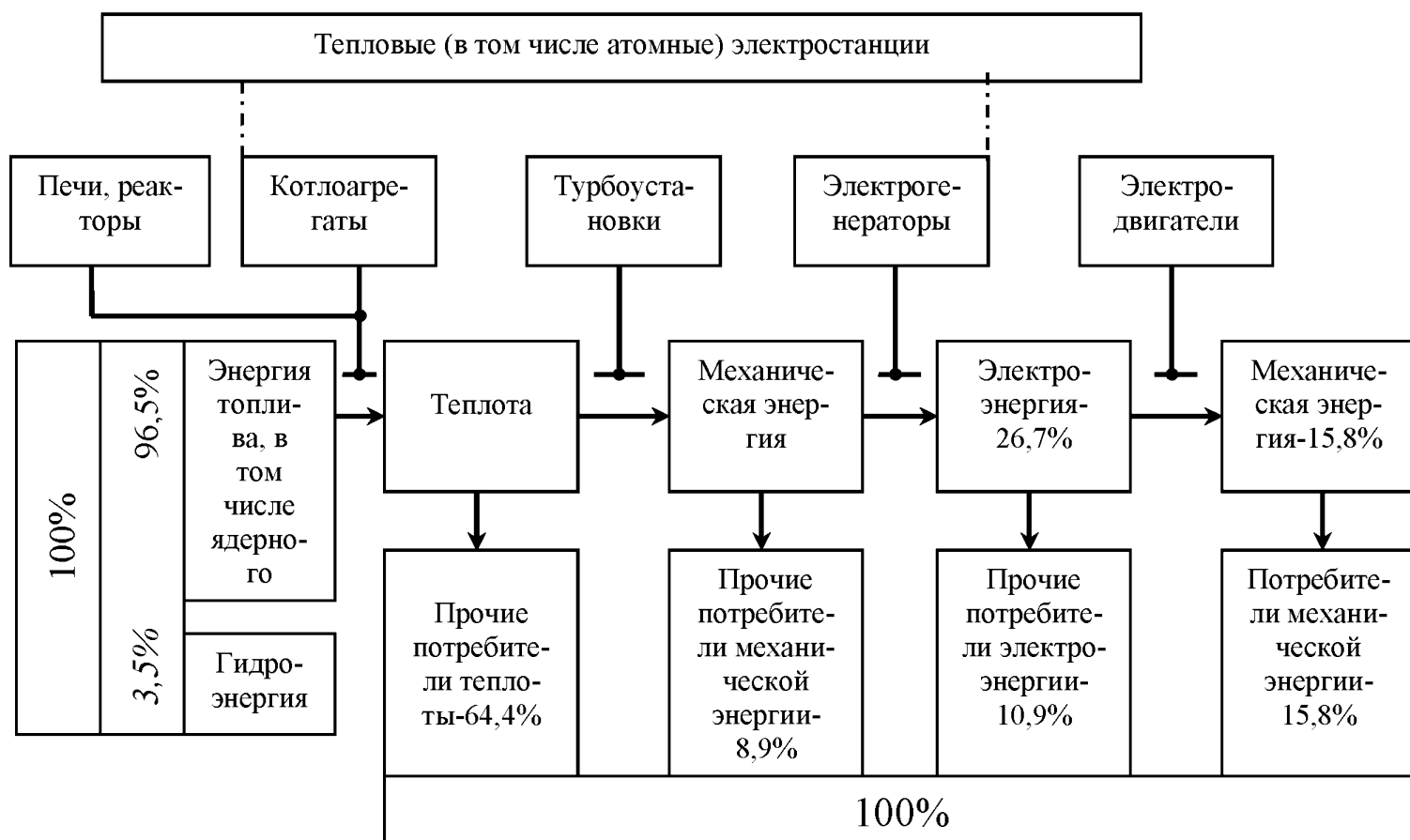


Рис.1.1. Принципиальная схема превращения энергии в сфере материального производства

Основным источником энергии (96,5%) является топливо, лишь 3,5% энергии вырабатывается гидроэлектростанциями. Современная электроэнергетика является по существу тепло- электроэнергетикой, поскольку электроэнергия в основном выраба-

тывается за счет преобразования теплоты химических реакций окисления топлива или реакций деления ядерного топлива. Почти вся подлежащая использованию энергия на первой стадии превращается в теплоту. Этот процесс осуществляется в котлоагрегатах, печах, различных реакторах. Две трети ($\approx 64,4\%$) полученной энергии используются далее в форме теплоты без дальнейшего преобразования в другие виды энергии. $\approx 31,1\%$ полученной энергии идет на генерирование электроэнергии, причем в подавляющем количестве в паровых турбинах, претерпев промежуточное превращение в механическую энергию. Затем 60% полученной электроэнергии вновь превращаются в механическую, которая расходуется на привод транспорта, станков, нагнетателей. Оставшиеся 40% тратятся на электротермические, электрохимические процессы, нужды освещения и пр.

Менее 10% энергии используется непосредственно в форме механической энергии в двигателях внутреннего сгорания на транспорте (наземном, водном, воздушном). Указанные соотношения, характеристика энергопревращений в целом сохраняются и для Беларуси.

1.1. Анализ топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь

Республика Беларусь (РБ), имеет дефицит собственных энергоресурсов. На рис.1.2 показано соотношение между собственными и импортными энергоресурсами,

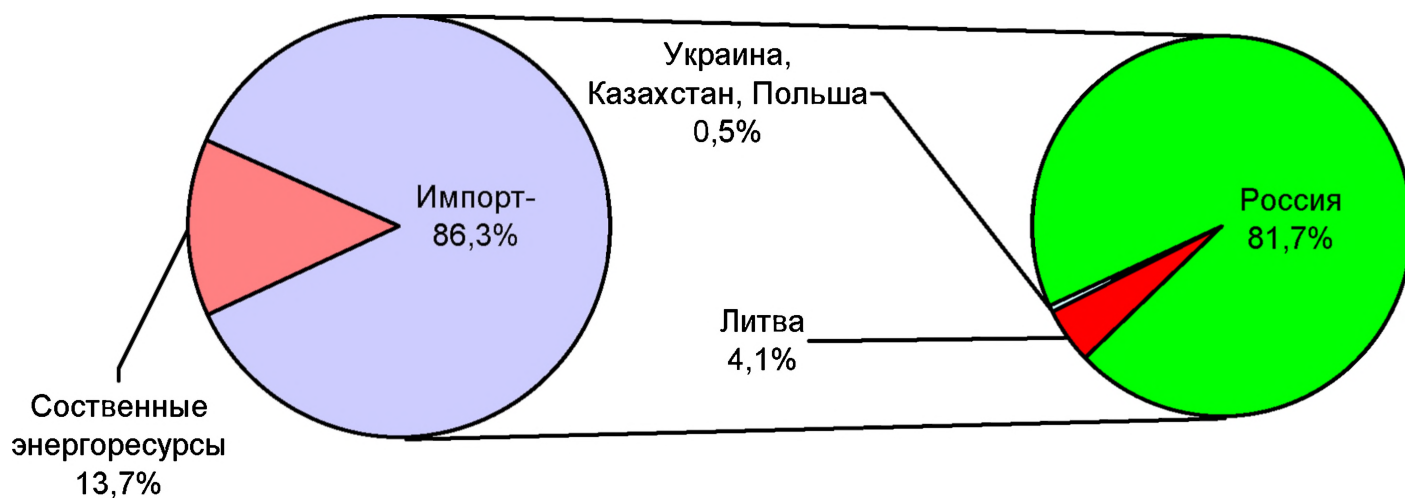


Рис.1.2. Поставщики энергоресурсов и их удельный вес в общем потреблении в 1998 году

потребленными РБ в 1998 году, а также удельный вес импортеров в поставках энергоресурсов. К иллюстрации можно добавить, что в будущем неизбежно уменьшение доли собственных энергоресурсов в их общем потреблении. Таким образом, для Республики Беларусь ТЭК имеет особое значение. Во-первых, потому, что создает необходимые условия для обеспечения жизнедеятельности во всех антропологических сферах. Во-вторых, ТЭК составляет значительную часть богатства страны: удельный вес производственных фондов ТЭК РБ оценивается в 25% основных фондов промышленности. Очевидно, что для нормального функционирования народного хозяйства требуется сохранение созданного ранее, однако это требует чрезвычайно больших затрат всех ресурсов. Последнее вызвано, в том числе, и тем, что на энергообеспечение своей деятельности и сам комплекс, и вся республика в целом расходует недопустимо большую долю зарабатываемых средств вообще и валютных, прежде всего. Эти затраты принято оценивать в долях от стоимости всего произведенного в стране, получившего название валового внутреннего продукта (ВВП). Ежегодные затраты на энергообеспечение РБ превышают 30% ВВП.

Для сравнения достаточно отметить, что доля заработной платы в стоимости ВВП имеет величину $3 \cdot 10^1$ %. В РБ отмечается диспропорция во вкладе энергопотребления в себестоимость ВВП в сравнении с другими странами, а это, во многом, определяет диспропорцию и прочих статей цены ВВП. Если оценить ВВП в долларах США, то, например, в развитых европейских странах энергоемкость ВВП не превысила 0,9 кг условного топлива на доллар США.

Необходимость резкого снижения энергоемкости ВВП РБ очевидна и жизненно необходима, что и объясняет происходящее изменение отношения к энергетическому аспекту жизнедеятельности государства. Благодаря принимаемым мерам наблюдается снижение энергоемкости ВВП, рис.1.3. Однако, надо отметить недостаточность имеющих место темпов снижения энергоемкости ВВП, чему имеются разные причины. Прежде всего, специфические особенности ТЭК как системы дорогостоящей, громоздкой и сложной, создаваемой в течение длительного периода, объективно не позволяют достигнуть радикальных изменений в короткие сроки. Несмотря на снижение энергоемкости ВВП в абсолютной величине расхода условного топлива, за отмеченный период затраты на энергоносители возросли на 11,2%. Последнее объясня-

ется как ростом цен на импортные энергоносители, так и увеличением затрат на их перемещение и переработку внутри страны. Например, в 1998 году стоимость природного

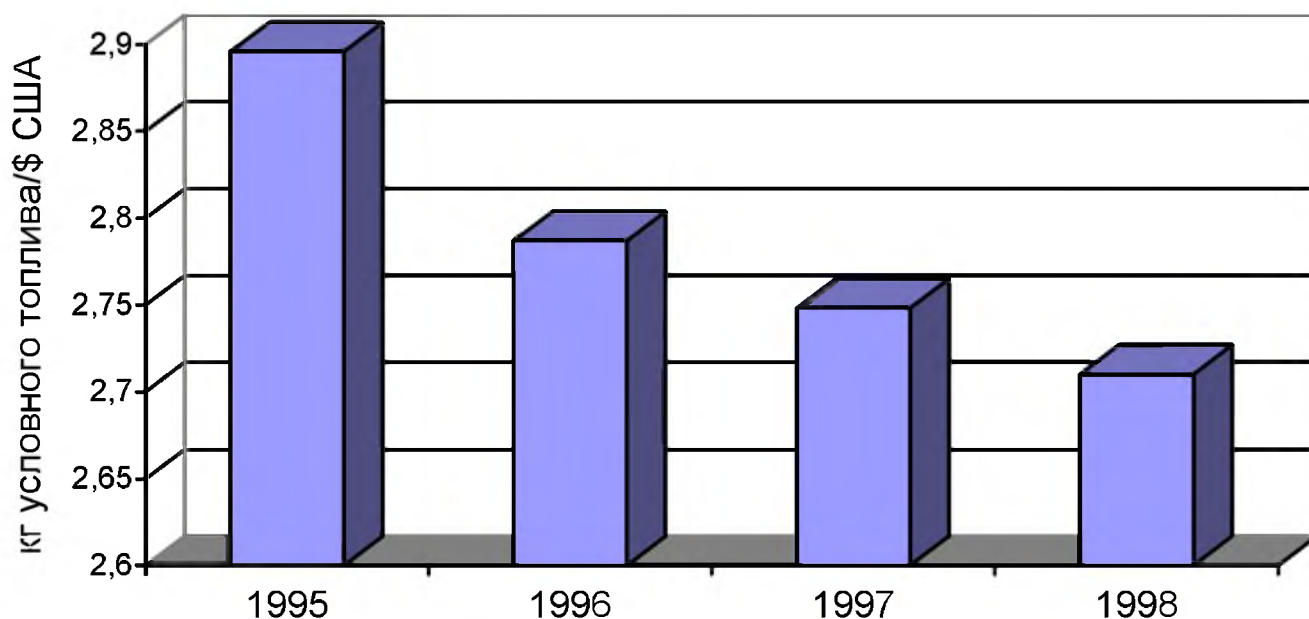


Рис.1.3. Динамика изменения энергоемкости ВВП продукта РБ

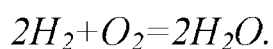
газа на границе РБ составила 43,3 \$ США в пересчете на тонну условного топлива, а у потребителя она выросла до 101,9 против 85,03 \$ США в 1996 году.

В силу ряда причин, для оценки расхода топливных энергоресурсов и потребности в них нашло широкое применение понятие «условное топливо». Под условным топливом понимают виртуальное топливо, теплота химической реакции окисления которого составляет величину 29,31 МДж (7000ккал) на килограмм топлива. Теплота химической реакции окисления является одной из характеристик топлива. Ее обычно определяют с помощью терминов «теплотворная способность» или «низшая теплота сгорания на рабочую массу» и обозначают Q_n^P . Для условного топлива равна $Q_n^P = 29,31$ МДж/кг.

Поясним, почему всегда используются определения «низшая» и «на рабочую массу» в названии теплоты сгорания топлива. Топливо может состоять только из горючего вещества (горючая масса), не содержать влаги, но иметь негорючие компоненты (сухая масса), наконец, содержать горючие, негорючие вещества и влагу (рабочая масса). Понятно, что в каждом из перечисленных случаях теплота реакции

окисления горючих веществ, отнесенная на различную массу смеси будет различной, что и определяет необходимость указания состава топлива

Относительно термина «низшая» можно отметить следующее. В продуктах горения топлива содержащего в своем составе водород, независимо от наличия в нем влаги, всегда будут иметь место водяные пары, как продукт реакции окисления водорода



Теплота процесса конденсации водяных паров весьма велика (при атмосферном давлении около $2,25 \cdot 10^3$ кДж на килограмм воды), продукты сгорания могут быть охлаждены до температуры, при которой не происходит конденсация водяных паров из дымовых газов, тогда при характеристике топлива говорят о «низшей» теплоте сгорания. Если все водяные пары продуктов сгорания сконденсировать, то теплота процесса конденсации может быть использована и, в этом случае, говорят о «высшей» теплоте сгорания.

Топливо-энергетический комплекс Республики Беларусь включает:

- систему снабжения природным газом;
- энергосистему, производящую электроэнергию и тепловую энергию;
- нефтедобычу и нефтепереработку с системой нефте- продуктопроводов;
- добычу торфа и производства торфобрикета;
- другие отрасли.

Управление отраслями ТЭК РБ осуществляют Минэкономики, концерны «Белэнерго», «Белтопгаз», «Белнефтехим», «Белтрансгаз». Следует признать, что сложившаяся система управления малоэффективна, поскольку отсутствует межведомственное оперативное управление, а также юридическая ответственность отраслей друг перед другом. Это создает объективные предпосылки для изменения управления ТЭК.

Краткая характеристика некоторых отраслей ТЭК Республики Беларусь, имеющей территорию 208 тыс. квадратных километров, население 10,23 млн. человек, приведена ниже.

Энергосистема РБ является основным производителем электроэнергии и, так называемой, тепловой энергии. Тепловая энергия - это часть внутренней энергии ма-

териальных носителей, передаваемой потребителям при тепловом взаимодействии с носителями как теплота процесса изменения их состояния.

Основные характеристики энергосистемы РБ. Установленная суммарная мощность энергосистемы составляет $7,4 \cdot 10^3$ МВт, в том числе: конденсационные тепловые электростанции (ТЭС) – две, общей мощностью $3,33 \cdot 10^3$ МВт; теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) – тепловые электростанции, производящие совместно электрическую и тепловую энергию. Суммарная электрическая мощность ТЭЦ $3,96 \cdot 10^3$ МВт, количество – 20 шт.; гидроэлектростанции – 11 шт., суммарной мощностью 8,0 МВт; промышленные электростанции (блок-станции) – 12 шт., общей мощностью 99,5 МВт. Установленная мощность достаточна для самообеспечения страны электроэнергией.

Протяженность высоковольтных линий электропередач: напряжением 750 кВ – 753 км; напряжением 330 кВ – 3686 км; напряжением 220 кВ – 2281 км; напряжением 110 кВ – 16095 км. Основными системообразующими сетями в 2000 – 2005 годах станут линии напряжением 330 кВ. Для транзита и экспорта электроэнергии в Польшу предусматривается сооружение двухцепной воздушной линии напряжением 400 кВ.

Для иллюстрации приведем основные показатели энергосистемы за 1998 год: производство электроэнергии – 23,2 млрд. кВт·ч (84,6 млн. ГДж); потребление электроэнергии – 34,2 млрд. кВт·ч (123,1 млн. ГДж); импорт электроэнергии – 10,7 млрд. кВт·ч (38,5 млн. ГДж); отпуск тепловой энергии – 149 млн. ГДж, в том числе паром из отборов турбин – 91,3 млн. ГДж.

За счет собственных электрогенерирующих мощностей покрывается около $7 \cdot 10^1\%$ потребности в электроэнергии. На выработку одного кВт·ч электроэнергии в среднем по энергосистеме затрачивается около $2,7 \cdot 10^2$ грамм условного топлива, что соответствует КПД равному 45 %. Технологический расход на транспорт электроэнергии (так называемые потери) равен 11,9%. Столь высокие показатели выработки одного кВт·ч электроэнергии объясняются двумя причинами: большим удельным весом ТЭЦ в структуре электрогенерирующих мощностей, равным 54%; возможностью импортировать электроэнергию в количествах, позволяющих отключать устаревшие генерирующие установки, характеризующиеся повышенным расходом топлива на выработку единицы электроэнергии.

Структура расходной части электробаланса РБ в 1997 г. представлена на рис.1.4.

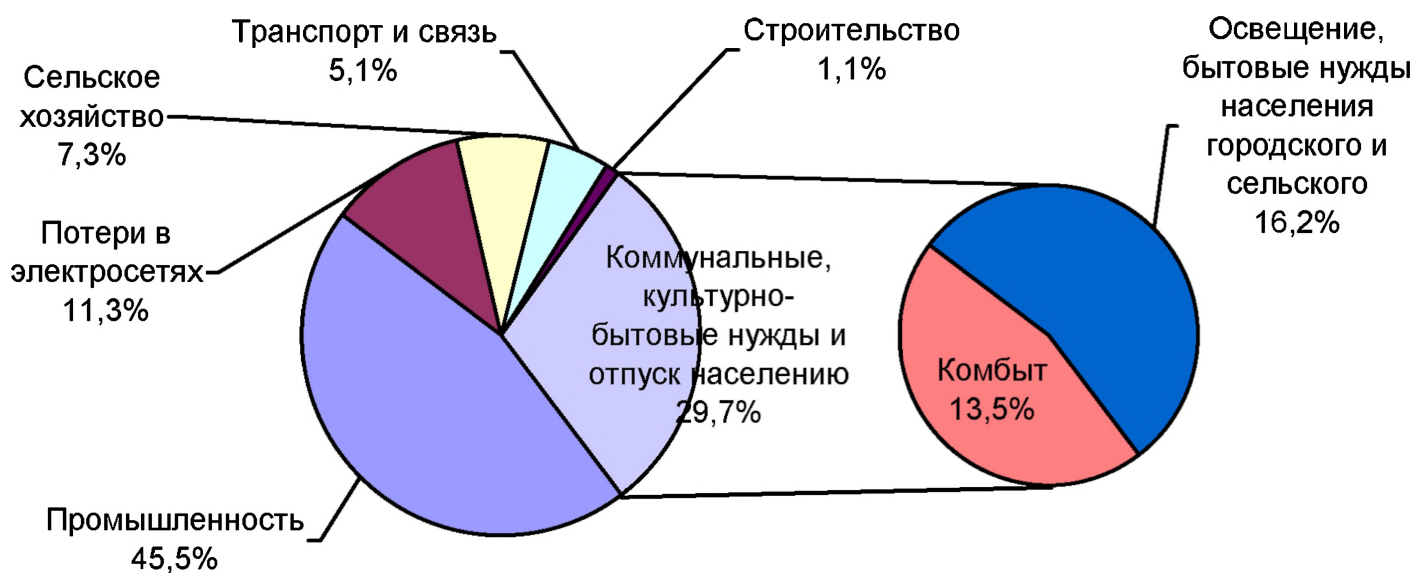


Рис.1.4. Структура расходной части электробаланса РБ в 1997 году

Система обеспечения газообразным топливом. Природный газ представляет смесь различных газов, прежде всего углеводородов, среди которых доминирует метан (CH_4). Он представляет собой наиболее удобное и ценное топливо с теплотворной способностью около 34 МДж/м^3 . От мест добычи до потребителя природный газ перемещается по системе трубопроводов.

Поставка природного газа осуществляется из России. В 1997 году в Беларусь поступило 15,8 млрд. куб. метров.

Основу газоснабжения РБ составляет газотранспортная система. Общая протяженность магистральных газопроводов превышает 6 тыс. километров. Транспорт природного газа по ним обеспечивают семь компрессорных станций, общей мощностью $0,71 \cdot 10^3 \text{ МВт}$. Кроме того, на первой нитке межгосударственного газопровода «Ямал-Европа», протяженность которого по территории РБ 575 км (диаметр 1420 мм), на территории Белоруссии имеется пять компрессорных станций общей мощностью 759 МВт. Известно, что в ближайшее время мощности по перекачке природного газа могут быть увеличены в связи с проходом через территорию Беларуси дополнительного магистрального газопровода. В этом случае отчисления за транзит газа существенно облегчат материальное положение страны.

Концевым сооружением магистрального газопровода является газораспределительная станция (ГРС), на которой осуществляется очистка газа от пыли и влаги, учет его расхода, снижение давления газа до требуемых величин, дополнительная одоризация (придание запаха) газа, а также реализуются мероприятия по электрозащите трубопроводов от коррозии. Около $2 \cdot 10^2$ ГРС и газопроводов-отводов проектной производительностью $8 \cdot 10^1$ млрд. м³ обеспечивают доставку газа потребителям республики. По производительности входных газопроводов и ГРС система позволяет многократно увеличить потребление газа. Средняя загрузка системы оценивается $2 \cdot 10^1\%$, что находится на нижнем, экономически целесообразном уровне. Для увеличения ее загрузки необходимо строительство газопроводов-отводов в районы, не охваченные газификацией. Таких районов более всего в Витебской, Могилевской и Гомельской областях. До 2005 года предусматривается строительство свыше 5 тыс. километров, из них более 2,4 тыс. км в городах и поселках, распределительных газопроводов к новым потребителям от существующих ГРС. В этот же период будет завершено строительство Прибугского подземного газохранилища на 1,35 млрд. м³ газа. Система газоснабжения неизбежно будет развиваться, поскольку природный газ останется основным энергоресурсом РБ в обозримом будущем.

Торф, дрова и отходы древесины. Потребление данных местных топлив в последнее время возросло на $2 \cdot 10^1\%$. Древесина является возобновляемым видом топлива, а вот запасы торфа (он еще является ценным сырьем) ограничены, не возобновляются и достаточно сильно истощены. Последнее объясняет снижение объема производства торфобрикета на $2 \cdot 10^1\%$. В 1997 году добыто 2,79 млн. тонн торфа (0,95 млн. тонн у.т.), произведено брикетов – 1,51 млн. тонн (0,91 млн. тонн у.т.). С изложенной ситуацией в отношении запасов торфа гармонирует положение с торфобрикетными заводами РБ, которые выработали свой ресурс на 90%.

Система обеспечения нефтепродуктами. Центрами системы обеспечения нефтепродуктами являются два нефтеперерабатывающих завода (НПЗ), расположенных на территории РБ: Новополоцкий НПЗ и Мозырский НПЗ. С помощью нефтепроводов и продуктопроводов, железнодорожных линий они связаны с транспортной сетью нефти и нефтепродуктов СНГ и Прибалтики, оставшейся от СССР. НПЗ РБ проводят модернизацию с целью увеличения глубины переработки нефти, повышения качества и

улучшения ассортимента основной продукции. На Мозырском НПЗ в результате реконструкции глубина переработки нефти достигла 76,2%.

В 1997 году добыто 1,82 млн. тонн нефти (2,64 млн. тонн у.т.), попутного газа 0,246 млрд. куб. м.(0,28 тонн у.т.). Импортировано из России нефти 10,46 млн. тонн.

Общие показатели. Обеспеченность собственными энергоресурсами всех видов, включая дрова, составляет 16%, другими словами, на территории РБ ежегодно добывается около 5 млн. тонн условного топлива. Наметилась тенденция снижения общего количества энергоресурсов, добываемых на территории РБ. В 1996 году добыто 5,25 млн. тонн условного топлива, в 1998 году – 4,69 млн. т у.т. За указанный период снижена добыча нефти на 1,6%, торфа – на 15,4%, при увеличении использовании дров на 15,8%.

В таблице 1.1 приведено потребление энергоресурсов Республикой Беларусь в 1994 – 1998 годах, на рис.1.9 – структура энергопотребления в 1997 году. Структура энергопотребления является важной характеристикой любой энергетической системы, показывающая какие виды энергоресурсов и в каком количестве требуются для ее функционирования.

Таблица 1.1

Потребление энергетических ресурсов в Республике Беларусь

№ п/п	Вид или форма потребления энергии	Потребление по годам в миллионах ГДж					
		1994	1995	1996	1997	1998	
1.	Электроэнергия	126,7	115,6	116,3	121,2	122,4	
2.	Теплота	325,3	304,4	326,2	334,1	304,0	
3.	Котельно-печное топл., в т.ч. в виде:	894,0	797,2	798,7	817,5	833,0	
3.1	топлива	858,8	744,5	762,4	785,8	-	
3.2	сырья	35,17	52,76	36,34	31,65	-	
4.	Светлых нефтепродуктов	137,8	140,7	134,8	134,2	-	
5.	Итого	млн. ГДж	1483,8	1357,9	1376	1407	-
		млн. тонн условного топлива	50,6	46,3	46,9	48,0	-

При анализе структуры энергопотребления следует учитывать, что первичным энергоресурсом, в основном, является топливо. Ни электроэнергия, ни тепловая энергия не являются первичными, а получают из топлива с тем или иным КПД. КПД выработки электроэнергии и тепловой энергии, в среднем по энергосистеме РБ, приведены выше. Понятно, что с учетом КПД выработки для обеспечения потребности

РБ в электроэнергии и теплоте необходимо закупить и ввезти энергии в виде топлива больше, чем следует из итоговой строки таблицы 1.1. Потребность РБ в первичном энергоресурсе приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Потребление первичных энергетических ресурсов в Республике Беларусь

№ п/п	Вид или форма потребления энергии	Потребление по годам				
		1994	1995	1996	1997	1998
1	2	3	4	5	6	7
1.	Электроэнергия					
	млрд. кВт·ч	35,2	32,5	33,0	33,5	34,0
	млн. ГДж	126,7	115,6	116,3	121,2	122,4
1.1.	Затраты первичного энергоресурса на производство электроэнергии					
	млн. ГДж	278,4	257,3	261,1	265,0	269,1
	млн. т условного топлива	9,50	8,78	8,91	9,04	9,18
2.	Теплота					
	млн. ГДж	325,3	304,4	326,2	334,1	304,0
	млн. Гкал	77,7	72,7	77,9	79,8	72,6
2.1.	Затраты первичного энергоресурса на производство теплоты					
	млн. ГДж	386,9	363,4	386,9	398,6	360,5
	млн. т условного топлива	13,2	12,4	13,2	13,6	12,3
3.	Котельно-печное топливо, в т.ч. в виде:	894,0	797,2	798,7	817,5	833,0
3.1.	топлива	858,8	744,5	762,4	785,8	-
3.2.	сырья	35,17	52,76	36,34	31,65	-
4.	Светлых нефтепродуктов	137,8	140,7	134,8	134,2	-
5.	Итого					
	млн. ГДж	1697	1558	1582	1615	-
	млн. тонн условного топлива	57,9	53,2	54,0	55,1	-

Структура затрат первичных энергоресурсов на обеспечение жизнедеятельности страны с учетом эффективности получения электроэнергии и тепловой энергии изменяется и для того же 1997 года имеет вид, показанный на рис. 1.5.

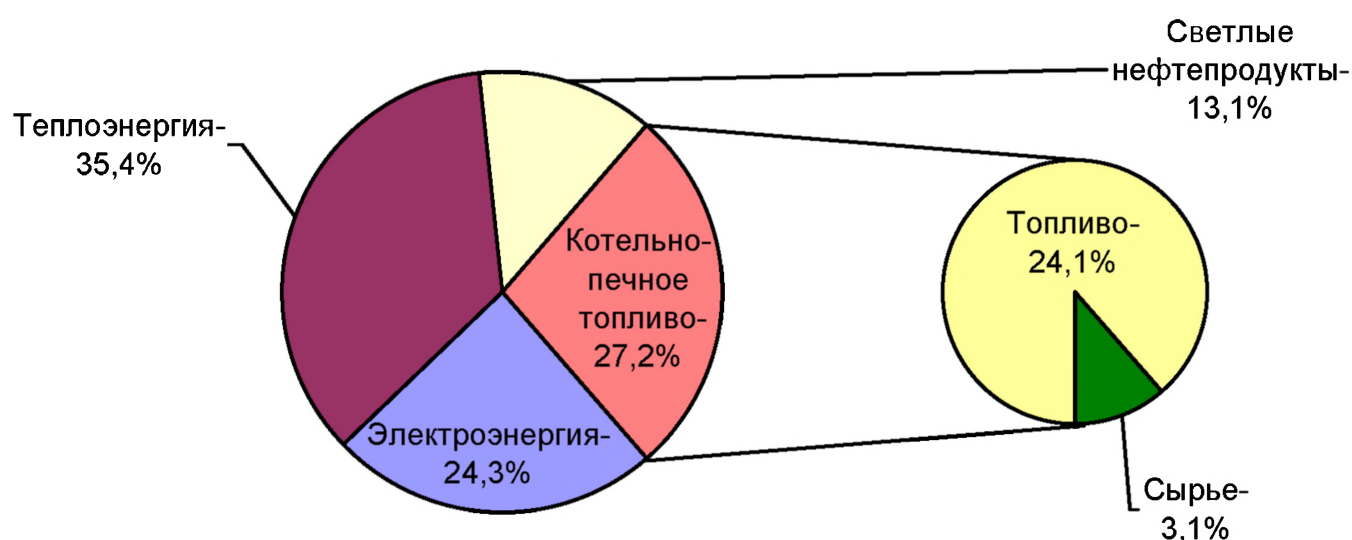


Рис.1.5. Потребление первичных энергоресурсов РБ в 1997 году с учетом эффективности получения электроэнергии и тепловой энергии

Из приведенных данных следует, что на получение теплоты расходуется более трети топлива. Примерно в равных количествах (по 24%) топливо тратится на производство электроэнергии и непосредственно в теплотехнологических и иных целях.

В 1997 году на электростанциях РБ выработано 26 млрд. кВт·часов электроэнергии, что обеспечило потребность страны на 77,4%. На долю промышленности пришлось 45,5% общего электропотребления, из которого 68,5% составили нужды черной металлургии, химической и нефтехимической отраслей, машиностроения, металлообработки, электроэнергетики.

Суммарное потребление энергоресурсов в 1997 году составило 35млн. тонн условного топлива. Структура их потребления по отраслям экономики представлена на рис.1.6.

В 1997 году произведено 334,1млн. ГДж (79,8 млн. Гкал) теплоты. Основными потребителями тепловой энергии в РБ в 1997 году явились коммунально-бытовой сектор (48,8%) и промышленность (36,1%).

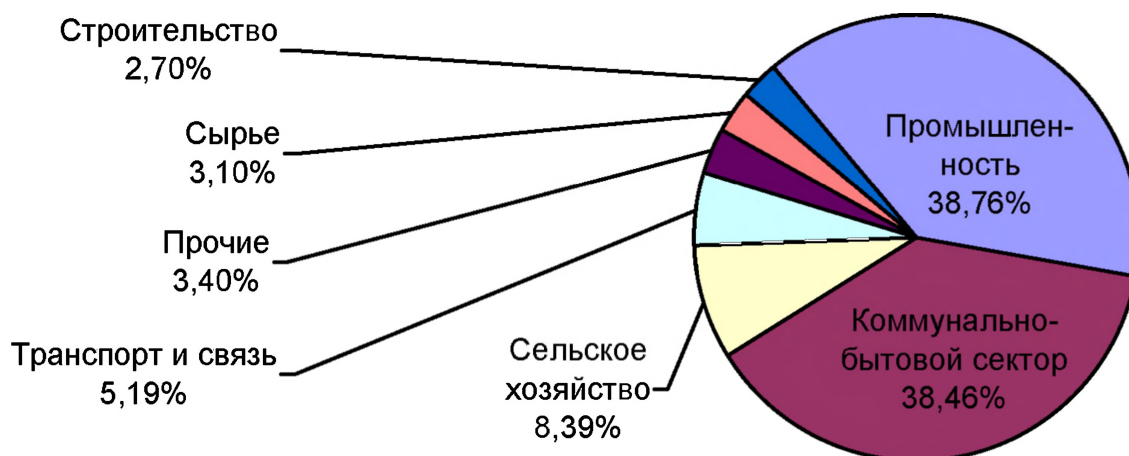


Рис.1.6. Структура суммарного потребления энергоресурсов РБ в 1997 году

1.2. Энергетическая политика Республики Беларусь

Надежное и эффективное энергообеспечение всех отраслей экономики и населения, способствующее достижения стандартов и качества жизни населения высокоразвитых европейских государств, сохранение окружающей среды, снижение энергоемкости ВВП и уменьшение зависимости от импорта энергоресурсов – основная цель

энергетической политики. В решении поставленных задач центральным аспектом является снижение энергоемкости ВВП. Потенциал энергосбережения оценивается на уровне 50% от суммарного энергопотребления страны. На 2001 – 2005 годы потенциал энергосбережения оценивается до 6 - 7 миллионов тонн условного топлива. Показательно распределение по отраслям указанной величины:

- коммунально-бытовой сектор – 3 млн. тонн;
- энергетика - 0,9 млн. тонн;
- химия и нефтехимия - 0,6 млн. тонн;
- сельское хозяйство – 0,5 млн. тонн;
- строительных материалов – 0,4 млн. тонн;
- машиностроение - 0,5 млн. тонн;
- топливная промышленность 0,1 млн. тонн;
- пищевая – 0,1 млн. тонн;
- прочие отрасли промышленности – 0,2 млн. тонн;
- прочие потребители – 0,2 млн. тонн.

Наибольшие возможности для снижения потребления первичных энергоресурсов сегодня находятся в коммунально-бытовом секторе, что объясняется наиболее сильными экстенсивным и интенсивным факторами, имеющими здесь место. Экстенсивный фактор очевиден: объем потребления энергоресурсов (рис. 1.6) здесь такой же как у всей промышленности в целом. Интенсивный фактор связан с низким температурным уровнем технологической операции, ради которой осуществляется потребление энергоресурса, а он в коммунально-бытовом секторе одна из самых низких. Чем ниже температура технологической операции, тем большие потери качества энергии имеют место при использовании традиционных способов энергообеспечения, основанных на прямом использовании высокопотенциальных энергоресурсов. При применении новых технологий, учитывающих требования второго закона термодинамики (качество энергопотребления), в данном случае, для получения низкопотенциальной тепловой энергии, используются скрытые резервы, которые намного превышают те, что достаточно широко известны и связаны со снижением энергопотребления на основе первого закона термодинамики (количество энергопотребления).

Из сравнения показателей (рис.1.3) РБ и развитых европейских стран (энергоёмкость ВВП последних не превысила 0,9 кг условного топлива на доллар США) очевидно, что даже его полная реализация не позволит добиться требуемого уровня энергоёмкости ВВП. Проблема усугубляется постоянным ростом затрат на энергоносители для получения единицы ВВП: в 1996 году они составили 0,545 долларов США для получения одного доллара ВВП; в 1998 году – 0,573. Следовательно, неизбежна реструктуризация промышленности, нацеленная на увеличение в ВВП веса менее энергоёмкой продукции.

Основные задачи энергосберегающей политики:

- структурная перестройка отраслей;
- повышение эффективности использования энергоресурсов;
- изменение структуры энергопотребления в сторону увеличения более дешёвых первичных энергоресурсов, доли местных топлив, отходов, нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов.

Основная роль в решении задач отводится государственному управлению, основным механизмом которого является регулирование потребления энергоресурсов посредством создания и использования законодательной и нормативной баз, а также экономических стимулов рационального использования энергоресурсов.

Организационно-экономические направления энергосберегающей политики:

- законодательная и нормативно-техническая базы;
- государственная экспертиза энергоэффективности проектов;
- энергоаудиты;
- прогрессивные нормы расхода энергоресурсов;
- тарифная политика;
- производство энергоэффективной продукции, ее энергомаркировка и сертификация по показателям энергопотребления;
- совершенствование правил учета энергоресурсов;
- разработка стандартов минимальной энергоэффективности и энергоёмкости по классам, гармонизация с директивами ЕС;

- реализация региональных, отраслевых программ энергосбережения и отдельных проектов.

Технические направления энергосберегающей политики:

- парогазовые, газотурбинные установки, мини-ТЭЦ, ГЭС;
- оптимизация работы энергоисточников, оптимальное распределение нагрузок энергосистемы;
- модернизация котельных, автоматизация процессов горения, мониторинг топочного режима на базе портативных измерителей тепловых потерь;
- модернизация теплоизоляции;
- котлоагрегаты, использующие в качестве топлива горючие отходы производства, сельского и лесного хозяйства, деревообработки;
- техническое перевооружение, оптимизация режимов загрузки электрических и тепловых сетей, трансформаторных подстанций и тепловых пунктов;
- регулируемый электропривод;
- объединение тепловых сетей, передача нагрузки от ведомственных котельных на ТЭЦ.
- децентрализация систем энергообеспечения с малыми нагрузками и резкопеременными режимами работы;
- замена электронагревательных установок, электрических печей и сушилок на топливоиспользующие установки, внедрение новых энергосберегающих технологий нагрева, термообработки, сушки;
- учет и регулирование энергоносителей, организация производства теплосчетчиков для влажного пара;
- внедрение современных строительных и теплоизоляционных материалов, спецдобавок при производстве железобетонных изделий;
- создание энерготехнологических комплексов при производстве цемента, стекла, кирпича, переработке нефти, в химической и пищевой промышленности;
- внедрение тепловых аккумуляторов, тепловых насосов в том числе и для более полного использования вторичных энергоресурсов;

- утилизация бытовых отходов, внедрение биогазовых установок, использование нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов, топлива из метанола и рапсового технического масла;
- увеличение доли дизельного автотранспорта, перевод его на сжиженный и природный газы. Использование экономичных двигателей и современных систем регулирования и диагностики;
- переход на энергоэффективные приборы, оборудование, материалы.

К 2005 году необходимо обеспечение прироста ВВП без увеличения потребности энергоресурсов, т.е. необходимо снизить энергоемкость ВВП на 15% в сравнении с 2000 годом. Для этого в Республике Беларусь в период 1996 – 2000 годы проведена большая работа: практически на пустом месте, созданы структура управления энергосбережением, законодательная база энергосбережения, финансово-механические механизмы энергосбережения – триада, без которой невозможно решение подобной задачи.

Структура управления энергосбережением представляет собой:

1. Государственный комитет по энергосбережению и энергетическому надзору.
2. Областные и Минское городское управления по надзору за рациональным использованием энергетических ресурсов.
3. Координационный межведомственный совет по энергосбережению и эффективному использованию местных топливных ресурсов.
4. Межведомственная комиссия по энергосбережению и соответствующие комиссии в областях и в г. Минске.
5. Экспертный совет при Государственном комитете по энергосбережению и энергетическому надзору.
6. Унитарные предприятия «Белэнергосбережение» и «Белинвестэнергосбережение».

Законодательная база энергосбережения включает:

1. Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении».
2. Закон Республики Беларусь «О внесении изменений и дополнений в Кодекс Республики Беларусь «Об административных правонарушениях» (в части определе-

ния ответственности должностных лиц за нерациональное использование топлива и энергии).

3. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 2 июля 1997 года № 819 «О дополнительных мерах по обеспечению эффективного использования топливно-энергетических ресурсов».

4. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19 июня 1998 года № 965 «О мерах по усилению работы по реализации энергосберегающей политики в Республике Беларусь» и ряд (более тридцати) других постановлений.

5. Нормативно-технические и правовые акты в сфере энергосбережения.

Финансово-экономические механизмы энергосбережения:

1. Республиканский фонд «Энергосбережение», наполняемый за счет платежей и отчислений в результате применения экономических санкций, добровольных взносов и других платежей в соответствии с законодательством и расходуемый на реализацию мероприятий по энергосбережению.

2. Уполномоченные банки имеют право предоставления льготных кредитов (половина ставки рефинансирования) субъектам хозяйствования на выполнение мероприятий по энергосбережению.

3. Субъектам хозяйствования независимо от форм собственности разрешено включать в себестоимость продукции в течение года после внедрения энерго- и ресурсосберегающих мероприятий стоимость сэкономленных энергоресурсов, материальных и сырьевых ресурсов и аккумулировать данные средства в создаваемых ими фондах «Энерго- и ресурсосбережение» с последующим их целевым использованием.

4. Инновационный фонд концерна «Белэнерго» финансирует на безвозвратной основе энергосберегающие мероприятия в организациях бюджетной сферы.

Потребление энергоресурсов в 2005 году оценивается в 32,6 миллионов тонн условного топлива, его структура, прогноз для РБ потребления энергоресурсов вообще и по отдельным видам, а также темпов роста ВВП приведен на рис. 1.7 – 1.12.

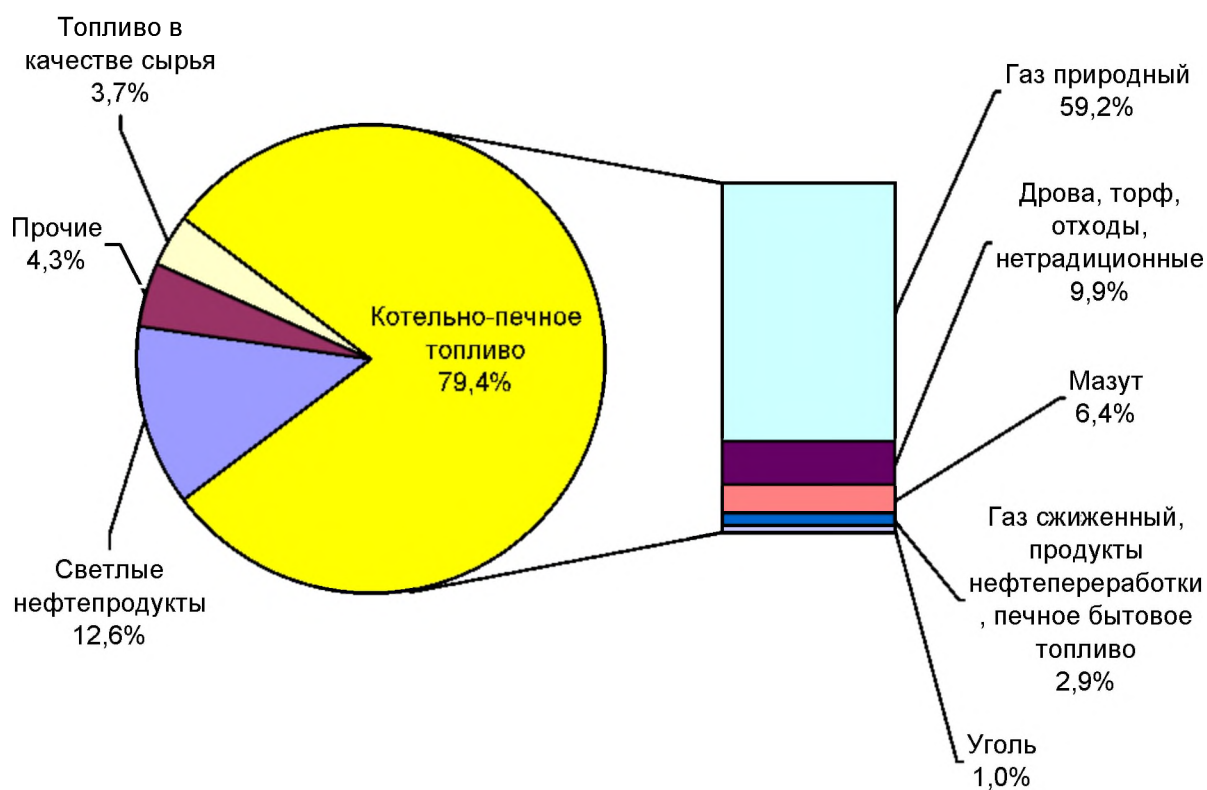


Рис.1.7. Потребление первичных энергоресурсов в РБ к 2005 году, всего 32,6 млн. тонн условного топлива

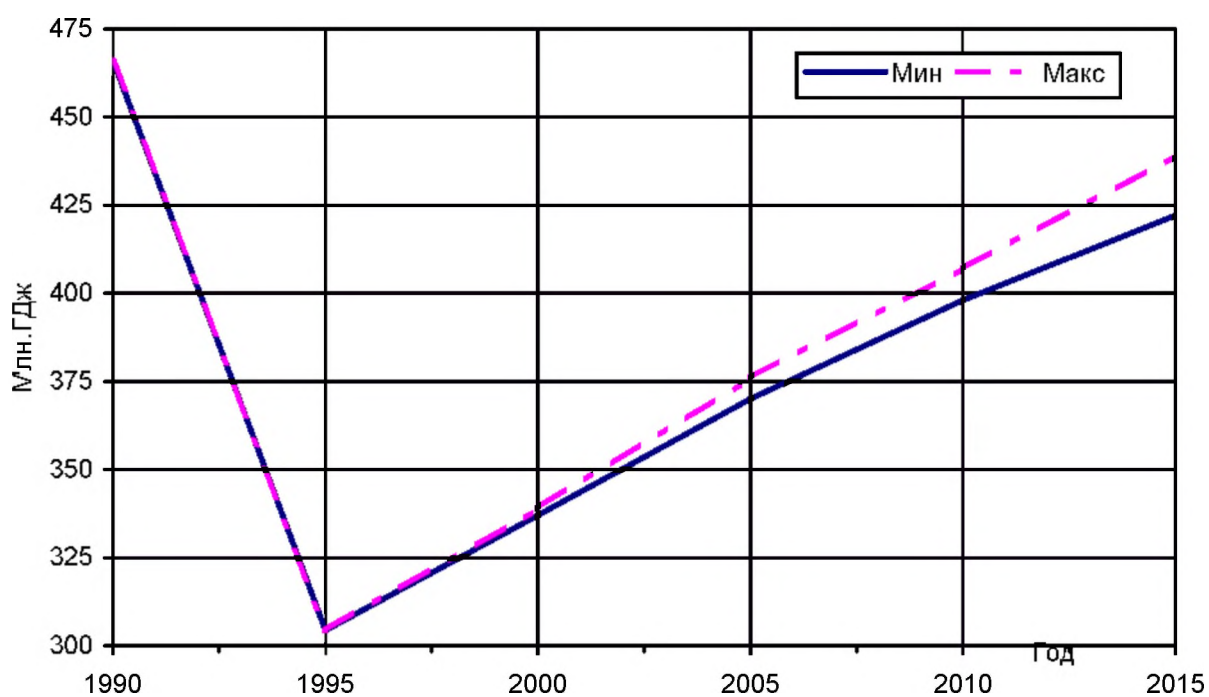


Рис.1.8. Прогноз потребления в РБ тепловой энергии

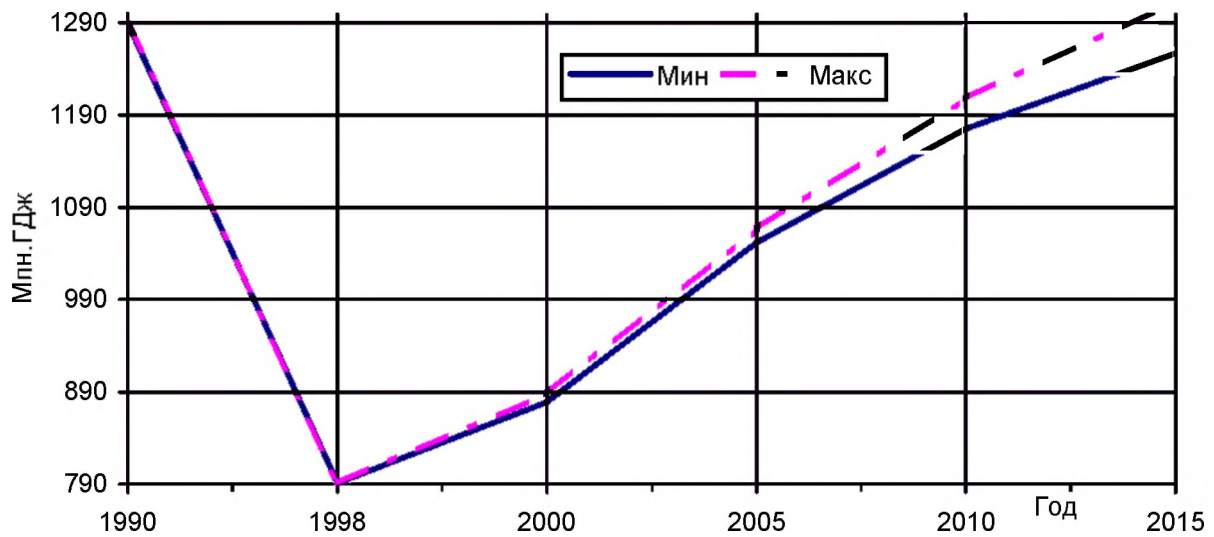


Рис.1.9. Прогноз потребления в РБ энергии котельно-печного топлива

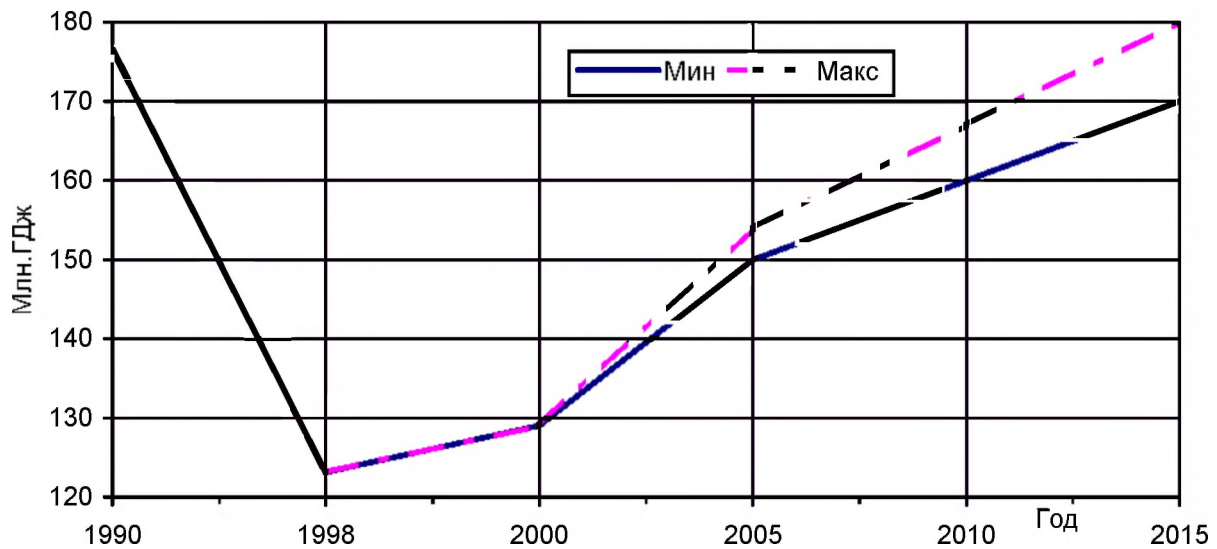


Рис.1.10. Прогноз потребления в РБ электрической энергии

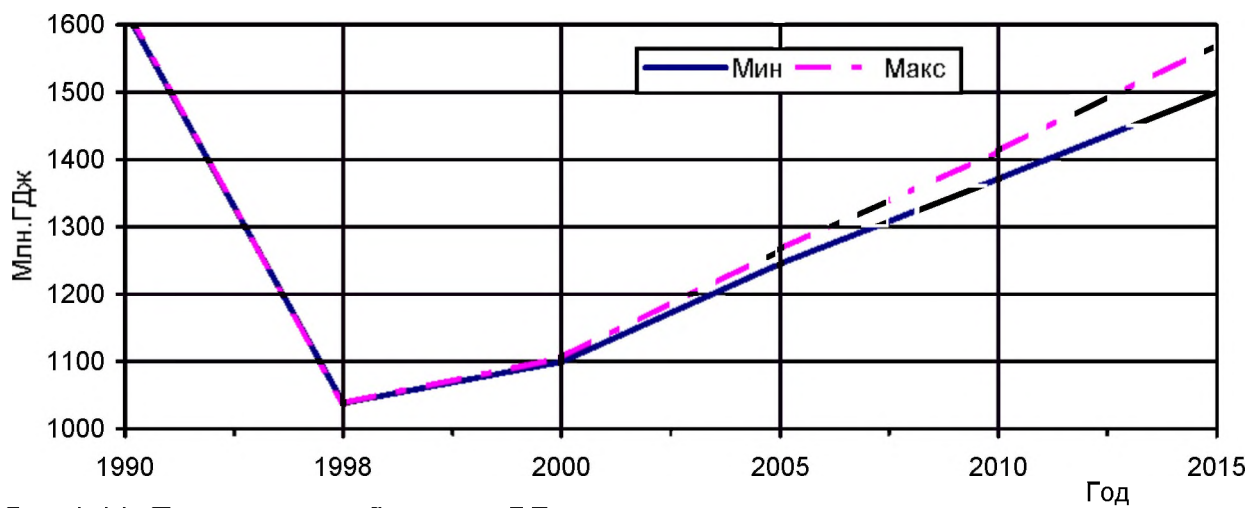


Рис.1.11. Прогноз потребления в РБ всех энергоресурсов

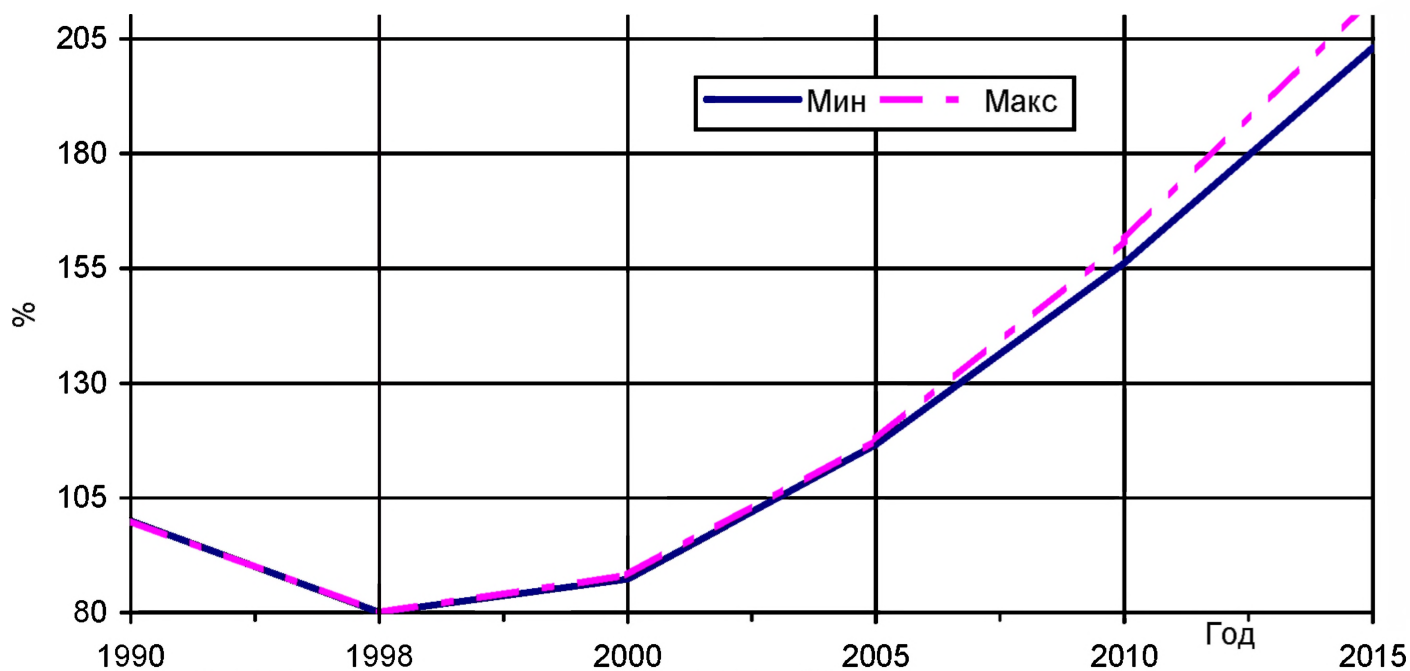


Рис.1.12. Прогноз темпов роста ВВП в РБ

Из всего вышеизложенного следует, что проблема повышения эффективности энергоиспользования, снижения энергопотребления для экономики РБ останется ключевой на обозримую перспективу. Структура энергопотребления, представленная в этой главе, не потеряет информативности в течение длительного отрезка времени, поскольку она объективно не может претерпеть резкого изменения и останется близкой к той, что имеет место в последнее время. Достигнутые темпы снижения энергоёмкости ВВП на уровне 3-4% смягчили проблему, но не решают задачу. Необходимо их увеличение до уровня 10%. Для этого, в первую очередь требуется развитие законодательно-правовой и нормативно-технической базы в части:

- 1) совершенствования экономических методов стимулирования повышения эффективности энергоиспользования, использования местных топлив, вторичных энергоресурсов, нетрадиционных источников энергии;
- 2) корректировки в части энергетической эффективности всех нормативных документов (ГОСТ, СТБ, СНиП, СНБ и т.д.) являющихся основой для проектирования всех объектов;
- 3) разработки нормативных документов для комплексного проектирования систем теплоснабжения (генерирующие источники, тепловые сети, потребители);
- 4) разработки энергетических стандартов на производимое и ввозимое оборудование;
- 5) совершенствования статистической отчетности и информационного обеспечения;

- 6) совершенствования системы стимулирования межотраслевого использования вторичных энергоресурсов;
- 7) разработки нормативных документов, обеспечивающих конкуренцию на всех стадиях существования объекта (разработка эскизного задания, проектирование, строительство, изготовление и внедрение);
- 8) развития новых форм финансирования, разработки, проектирования и внедрения энергоэффективного оборудования;
- 9) нормирования и контроля соблюдения норм расхода энергоресурсов всех потребителей путем создания системы мониторинга;
- 10) установления ежегодных целевых показателей по снижению предприятиями удельного энергопотребления при выпуске продукции, а по областям и республике – энергоемкости ВВП;
- 11) разработки критериев оптимизации и стимулирования развития производительных сил с целью снижения энергоемкости ВВП за счет структурной перестройки промышленности.

Для выполнения требований новой законодательно-правовой и нормативно-технической базы потребуется следующий комплекс мероприятий:

- 1) непрерывная модернизация всех промышленных объектов в части энерготехнологической реструктуризации производственного процесса на основе борьбы с потерями эксергии;
- 2) комбинирование технологических процессов и интеграция различных производств;
- 3) интеграция теплоэнергетических систем промышленных предприятий с городскими системами теплоснабжения;
- 4) непрерывная ревизия наиболее энергоемких теплотехнологий и оборудования;
- 5) создание комплексного управления энергопотребляющими системами;
- 6) создание и обеспечение функционирования системы непрерывной и неформальной переподготовки специалистов-энергетиков в соответствии со структурой энергопотребления, рис.1.4;
- 7) создание системы непрерывного и неформального контроля за соблюдением всех норм, правил, характеристик оборудования;

8) оснащение приборами учета и регулирования всех потребителей энергии.

Очевидно, что в настоящее время обеспечение республики энергоресурсами в основном зависит от одного энергоэкспортера. Местные энергоресурсы могут обеспечить в год до 4 млн. тонн у. т. Необходимо повысить энергетическую безопасность РБ путем расширения количества стран экспортеров топлива, так как в случае ограничения поставок энергоресурсов республика из-за недопроизводства ВВП несет ущерб, оцениваемый на каждую недопоставленную тонну условного топлива в размере $0,5 \cdot 10^3$ \$.

1.3. Обеспечение энергоресурсами Республики Беларусь

Как ранее отмечалось, собственные ресурсы покрывают потребность РБ на уровне 13%. Возможные варианты обеспечения энергоресурсами следующие.

Природный газ. Собственного природного газа РБ не имеет и полностью его импортирует. Газоснабжение производится по газопроводам, существующим и вновь сооружаемым, из России, а также из Туркмении через Узбекистан, Казахстан, Россию и Украину. Немаловажным положительным фактором, который следует использовать для извлечения дополнительных прибылей, является географическое положение РБ, при котором через ее территорию осуществляется частичный транзит газа в Европу.

Нефть и попутный газ. Нефтеобеспечение РБ сегодня осуществляется частично за счет собственных месторождений, а в основном - за счет импорта. Основные направления поставки нефти: из России по нефтепроводам; от иных экспортеров (из зон Северного моря и Персидского залива) через территории других сопредельных государств комбинированной трубопроводно-морской или железнодорожно-морской схемой транспорта. Основной альтернативный России вариант импорта нефти являются, конечно, страны Персидского залива. Стоимость доставки в этом варианте оценивается ≈ 34 \$/т. Общая потребность в поставках составляет примерно 21 млн. тонн в год.

Объемы собственной добычи нефти снижаются. Прогнозируемую динамику этого процесса иллюстрирует рис. 1.12. Добыча попутного газа к 2010 году снизиться до 160 млн. м³, а к 2015 году - до 150 млн. м³.

Месторождения нефти в РБ сосредоточены в Припятской впадине. Начальные извлекаемые ресурсы составили $0,36 \cdot 10^3$ млн. тонн. С начала разработки добыто

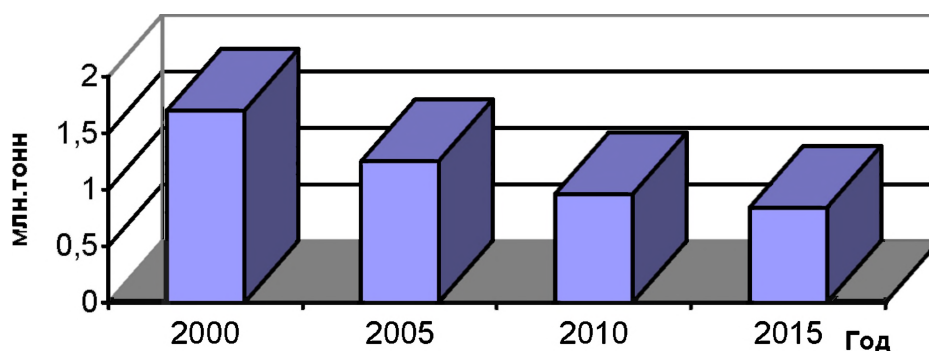


Рис.1.12. Объемы добычи нефти в РБ

$0,10 \cdot 10^3$ млн. тонн нефти и более 10 млрд. м^3 попутного газа. Остаточные запасы нефти промышленных категорий оцениваются 66 млн. тонн, попутного газа – 9,5 млрд. м^3 . Незазведанные ресурсы нефти оцениваются в $0,2 \cdot 10^3$ млн. тонн. Таким образом, обеспеченность активными запасами составляет $2 \cdot 10^1$ лет, трудно извлекаемыми – $3 \cdot 10^1$ лет.

Торф. На территории РБ разведано $9 \cdot 10^3$ торфяных месторождений, общей площадью, в границах промышленной глубины залежей, 2,5 млн. гектаров, исходным запасом 5,6 млрд. тонн. К настоящему времени запасы оцениваются в 4,3 млрд. тонн, или 75% начальных. Основные запасы торфа залегают на месторождениях, используемых сельским хозяйством (1,7 млрд. тонн или 40% оставшихся) или являющихся природоохранными объектами (1,6 млрд. тонн или 37% оставшихся запасов). Ресурсы торфа, которые подлежат разработке, оцениваются в $2,6 \cdot 10^2$ млн. тонн (6% оставшихся запасов), извлекаемые при разработке месторождений запасы составляют $1,4 \cdot 10^2$ млн. тонн. Намечаемые объемы производства торфяного топлива, в пересчете на условное топливо, не превысят 1 млн. тонн в год. При этом необходимо совершенствовать технологию добычи с целью увеличения степени извлечения, использовать мобильные торфобрикетные заводы, увеличивать долю кускового торфа, с доведением его количества до $1 \cdot 10^2$ тыс. тонн.

Горючие сланцы. Сланцы РБ являются низкосортным топливом: теплота сгорания их лежит в пределах 4,2 – 6,3 МДж/кг, зольность - на уровне 75%, содержание серы – 2,6%, выход смол – до 9%. Требуется их предварительная термическая обработка с получением жидкого и газообразного топлива, что делает стоимость получаемых

продуктов выше мировых цен на их аналоги на основе нефти. Месторождения сланцев расположены в районах Любани и Турова. Их потенциал оценивается в 11 млрд. тонн, из которых к промышленным запасам относится 3 млрд. тонн. Наиболее изучено Туровское месторождение, в пределах которого разведано предварительно первое шахтное поле с запасом сланцев не более $7 \cdot 10^2$ млн. тонн.

Уголь. В поставках угля отсутствует монополия (рис.1.4). В перспективе возможно увеличение потребления угля, в пересчете на условное топливо, до 300 млн. тонн для замещения газа и, прежде всего, мазута на тепловых электростанциях. Вместе с тем, надо понимать, что увеличение потребления угля связано с резким нагрузкой на окружающую среду. Потребуется большие затраты на подавление выбросов, что на порядок увеличит себестоимость электроэнергии, резко обострит радиационную обстановку. К перечисленным ранее (рис.1.4.) поставщикам угля могут добавиться Австралия (цена 34-35 \$ США, доставка 11-14 \$ США), Южная Африка (цена 30-31 \$ США, доставка 11-14 \$ США). Изменение цен на уголь возможно, но сохранение пропорций между поставщиками, вероятно, сохранится.

Бурые угли. Известны три месторождения бурых углей в РБ: Житковическое, Бриневское и Тонежское, общий потенциал которых оценивается в 151,6 млн. тонн. Угли этих месторождений низкосортные: низшая теплота сгорания 6,3 – 7,1 МДж/кг, влажность 56 - 60%, зольность $(1,7 - 2) \cdot 10^1\%$. Как бытовое топливо бурые угли возможно использовать после брикетирования с торфом. На базе Житковического месторождения возможно строительство карьера годовой мощностью 2 млн. тонн, при этом стоимость строительства оценивается в 85 млн. долларов США. В настоящее время разработка месторождений бурых углей РБ нецелесообразна.

Дрова. Дрова относятся к возобновляемым энергоресурсам. Дрова, как топливо, характеризуются: переменной влажностью $W^p = 20 \div 55\%$; низкой зольностью $A^c \approx 1\%$; большим выходом летучих горючих веществ $V^r \approx 85\%$; отсутствием серы; плотностью 400 – 800 кг/м³; невысокой теплотворной способностью и существенным колебанием ее в зависимости от влажности. Для определения теплотворной способности дров можно воспользоваться соотношением $Q_n^p = 18,423 - 0,20935 \cdot W^p$ МДж/кг;

Объем централизованных заготовок дров и отходов лесопиления достигает 1 млн. тонн в пересчете на условное топливо. Самозаготовки населения составляют 0,4 млн.

тонн у.т. Естественный годовой прирост древесины определяется в 25 млн. м³, что эквивалентно 6,6 млн. тонн у.т. При этом, на зараженные радионуклидами районы РБ приходится 20 млн. м³ прироста древесины. Прогнозируемый объем древесного топлива к 2015 году составляет 2 млн. тонн условного топлива. В РБ в ряде областей закладываются опытные энергетические плантации быстрорастущих деревьев. Например, канадская ива позволяет собрать за два года с одного гектара, в энергетическом эквиваленте, до 16 тонн условного топлива; Сахалинский бамбук в течение года дает соответственно 8 тонн условного топлива.

Гидроэнергетический потенциал. В 1998 году на гидроэлектростанциях РБ выработано 28 млн. кВт·часов электроэнергии, что составляет около 0,1% общей выработки (эквивалентно 9 тыс. тонн условного топлива). Потенциальная мощность всех гидроресурсов РБ оценивается в $8,5 \cdot 10^2$ МВт, из них технически доступная мощность равна $5,2 \cdot 10^2$, экономически целесообразная – 250 МВт. (Сегодня, как ранее указывалось, мощность всех гидроэлектростанций РБ составляет 8 МВт). Единичная мощность гидроагрегатов оценивается в $(5 - 50) \cdot 10^1$ кВт, при этом, использование асинхронных электрогенераторов, параллельная работа их с энергосистемой позволяют упростить инженерные решения.

Ветроэнергетический потенциал. На территории РБ выявлено до $2 \cdot 10^3$ площадок для размещения ветроустановок с суммарным энергетическим потенциалом $1,6 \cdot 10^3$ МВт и годовой выработкой электроэнергии – 6,5 млрд. кВт·ч. Традиционные лопастные ветроэнергетические установки (ВЭУ) имеют стоимость $(1 - 1,5) \cdot 10^3$ \$ США за кВт установленной мощности. Их отличает высокие пусковая (4-5 м/с) и номинальная (8 – 15 м/с) скорость ветра, что не подходит для условий РБ, где слабые континентальные ветры (3 – 5 м/с) не могут обеспечить должную величину годовой производительности. Кроме того, для обеспечения надежности электроснабжения, параллельно с ВЭУ необходимо иметь резерв мощностей других типов электростанций, что понижает конкурентоспособность ВЭУ.

Основное применение ВЭУ в РБ в ближайшее время – мелкие, локальные потребители, не предъявляющие высоких требований к качеству электроснабжения. Это

насосные установки мощностью до 8 кВт мощности, подогреватели воды в сельском хозяйстве и т.п. Годовая экономия условного топлива оценивается в 3 тыс. тонн.

Биомасса. Биоотходы сельского хозяйства могут быть использованы для производства биогаза. Потенциал РБ в производстве товарного биогаза оценивается в $1,6 \cdot 10^2$ тыс. тонн условного топлива. Здесь требуется комплексная оценка эффективности использования биомассы с учетом:

- получения без дополнительных энергозатрат экологически чистого, высококачественного органического удобрения;
- снижения потребности в энергоемких минеральных удобрениях;
- улучшения экологической обстановки на полях и вокруг животноводческих комплексов.

Оценивая энергетический потенциал биомассы, следует учитывать возможности использования отходов сельскохозяйственного растениеводства. Для условий РБ он составляет 1,5 млн. тонн условного топлива в год.

Здесь следует отметить и такой энергоресурс, как фитомасса быстрорастущих растений. В условиях РБ с гектара энергетических плантаций, которые целесообразно размещать на выработанных торфяниках (площадь таких месторождений в РБ составляет $18 \cdot 10^1$ тыс. гектаров), не пригодных для выращивания продуктивных культур, можно получить до 10 тонн сухого вещества, что эквивалентно 5 тоннам условного топлива. Продуктивность плантации может быть увеличена в 2-3 раза за счет агротехнических приемов. Из указанного количества фитомассы можно получить 5-7 тонн жидких продуктов, замещающих нефтепродукты.

Солнечная энергия. В среднем в течение года в РБ можно принимать число ясных дней составляет примерно $\approx 3 \cdot 10^1$, пасмурных $\approx 25 \cdot 10^1$, дней с переменной облачностью $\approx 18 \cdot 10^1$. Себестоимость электроэнергии, полученной на солнечных электростанциях, в настоящее время многократно превышает таковую при традиционном производстве.

Основным направлением использования энергии солнца следует считать нагрев воды в гелиоводоподогревателях с полиэтиленовыми коллекторами, производство которых налажено в РБ. За счет солнечной энергии в РБ возможно заместить до 5 тыс. тонн условного топлива ежегодно.

Твердые бытовые отходы (ТБО). Как топливо ТБО характеризуются низшей теплотой сгорания 3 – 8 МДж/кг, зольностью 40 - 70%. Наиболее перспективно ТБО газифицировать для последующего использования полученного газа. В РБ ежегодно накапливается 2,4 млн. тонн ТБО. Потенциальная энергия, заключенная в них равноценна $4,7 \cdot 10^2$ тыс. тонн у. т. При их газификации эффективность потенциала уменьшается и составит 20 – 25%, в этом случае количество получаемой по Минску энергии можно оценить в 30 тыс. тонн условного топлива.

Вторичные энергоресурсы (ВЭР). Общий выход ВЭР в республике оценивается в $9 \cdot 10^1$ млн. ГДж в год, из них тепловые ВЭР составляют $7 \cdot 10^1$ млн. ГДж. В последних доля низкопотенциальных ВЭР оценивается в $5 \cdot 10^1\%$. Использование тепловых ВЭР оценивается в $2 \cdot 10^1\%$, использование горючих ВЭР – 85%. (Более правильным, облегчающим оценку перспектив использования ВЭР, мог бы стать расчет величины эксергии ВЭР). Использование ВЭР требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае. Как правило, это связано с трудностями сопряжения неравномерных графиков генерирования ВЭР с требованиями пользователей энергии, разной ведомственной принадлежностью производителей и возможных потребителей ВЭР и многими другими факторами при кажущейся, на первый взгляд, простоте проблемы.

К 2005 году прогнозируемый объем потребления местных энергоресурсов составит 5,6 миллионов тонн условного топлива. Структура их потребления следующая:

- нефть 2,22 млн. тонн условного топлива;
- Дрова и отходы 1,6 млн. тонн условного топлива;
- Торф 1,1 млн. тонн условного топлива;
- Попутные газы 0,3 млн. тонн условного топлива;
- Фитомасса 0,2 млн. тонн условного топлива;
- Гидроэнергетика 0,04 млн. тонн условного топлива;
- Ветроэнергетика 0,025 млн. тонн условного топлива;
- Отходы растениеводства 0,025 млн. тонн условного топлива;
- Солнечная энергия 0,025 млн. тонн условного топлива;
- Твердые и бытовые отходы 0,02 млн. тонн условного топлива;
- Биогаз 0,015 млн. тонн условного топлива;

1.4. Структура промышленного энергопотребления

Промышленность потребляет 39% всей энергии РБ (рис.1.6) и делит абсолютное лидерство с коммунально-бытовым сектором по суммарному потреблению энергоресурсов. В промышленности потребляется 46% вырабатываемой в РБ электроэнергии, 36% тепловой энергии, 12% необходимого стране котельно-печного топлива (рис.1.5).

Интерес представляет структура энергопотребления по отраслям промышленности суммарного и по отдельным видам энергоресурсов. Для РБ в 1997 году она приведена на рис. 1.13 – 1.16. Из представленных данных следует, что в общем энергопотреблении и в потреблении отдельных видов энергоресурсов лидерами является химическая и нефтехимическая отрасль промышленности РБ. Лишь в технологическом потреблении топлива она занимает третье место после топливной и строительной отраслей.

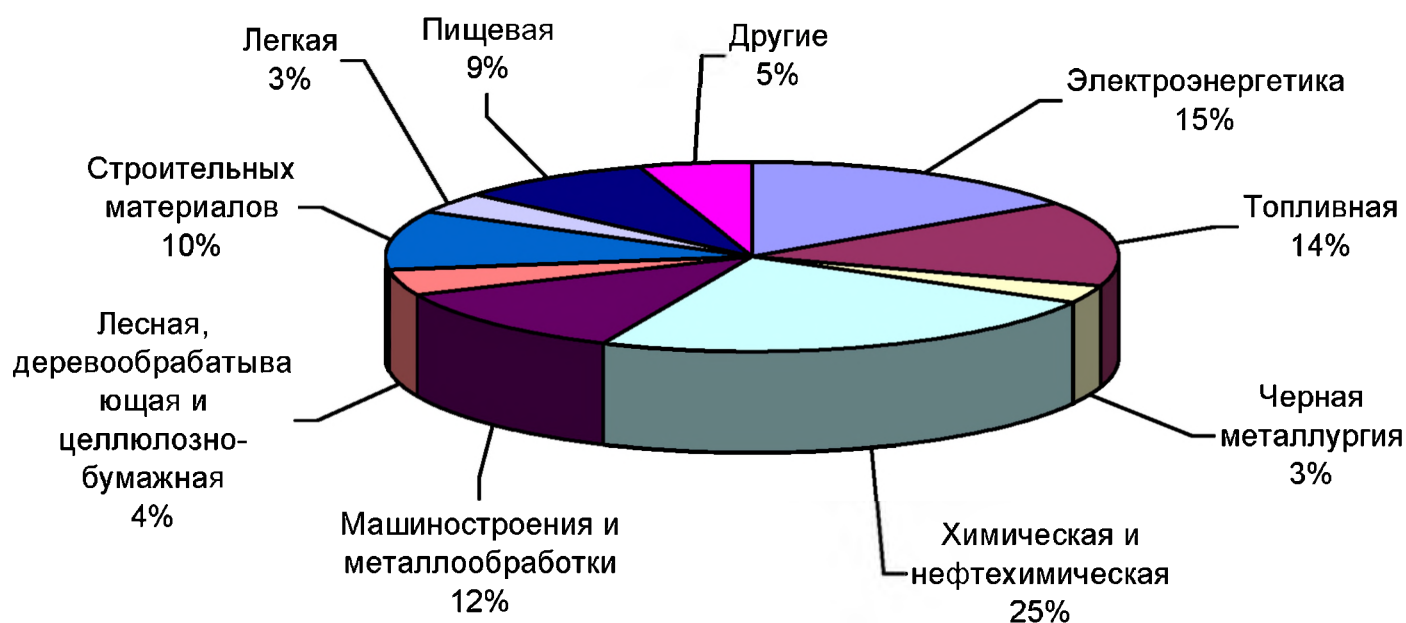


Рис.1.13. Структура суммарного энергопотребления отраслями промышленности

Не меньший интерес, на наш взгляд, представляет производство строительных материалов. Во-первых, оно является крупнотоннажным и широко представлено в республике. Во-вторых, ряд производств индустрии строительных материалов достаточно децентрализовано, что осложняет решение проблемы эффективного энергоиспользования, повышает роль верхних структур вертикали управления.

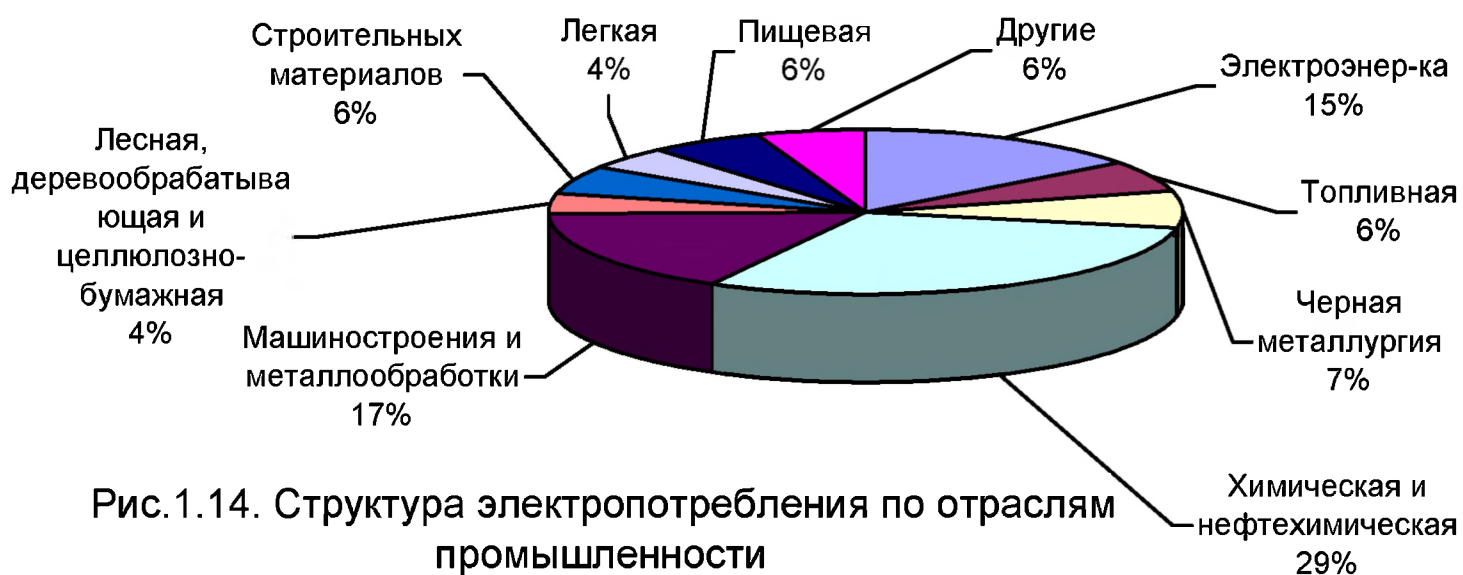


Рис.1.14. Структура электропотребления по отраслям промышленности

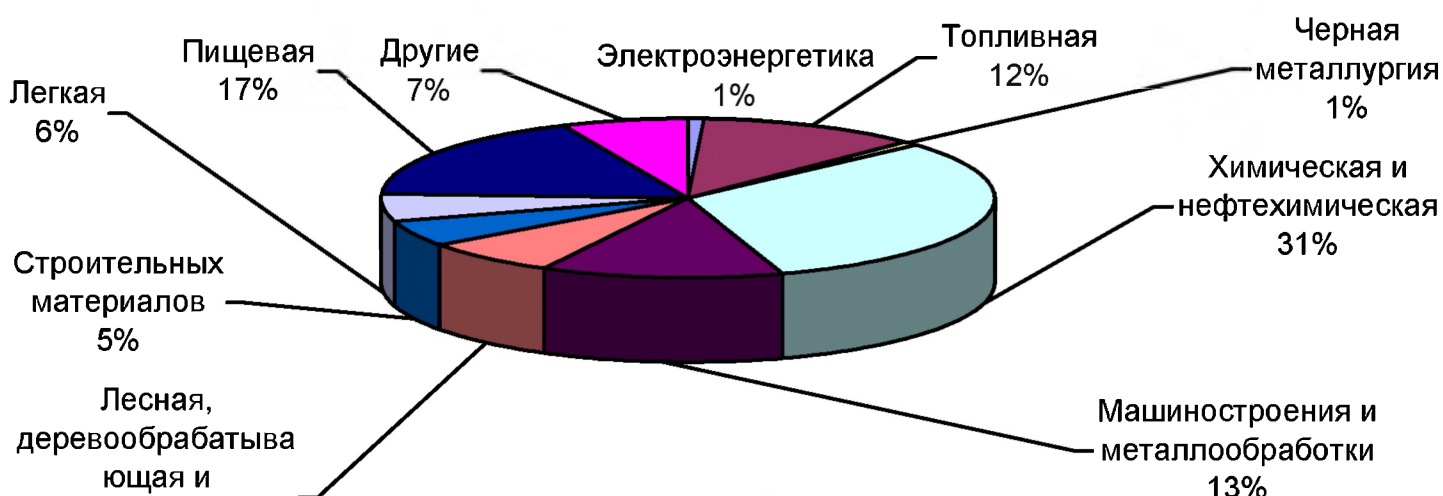


Рис.1.15. Структура теплотребления по отраслям промышленности

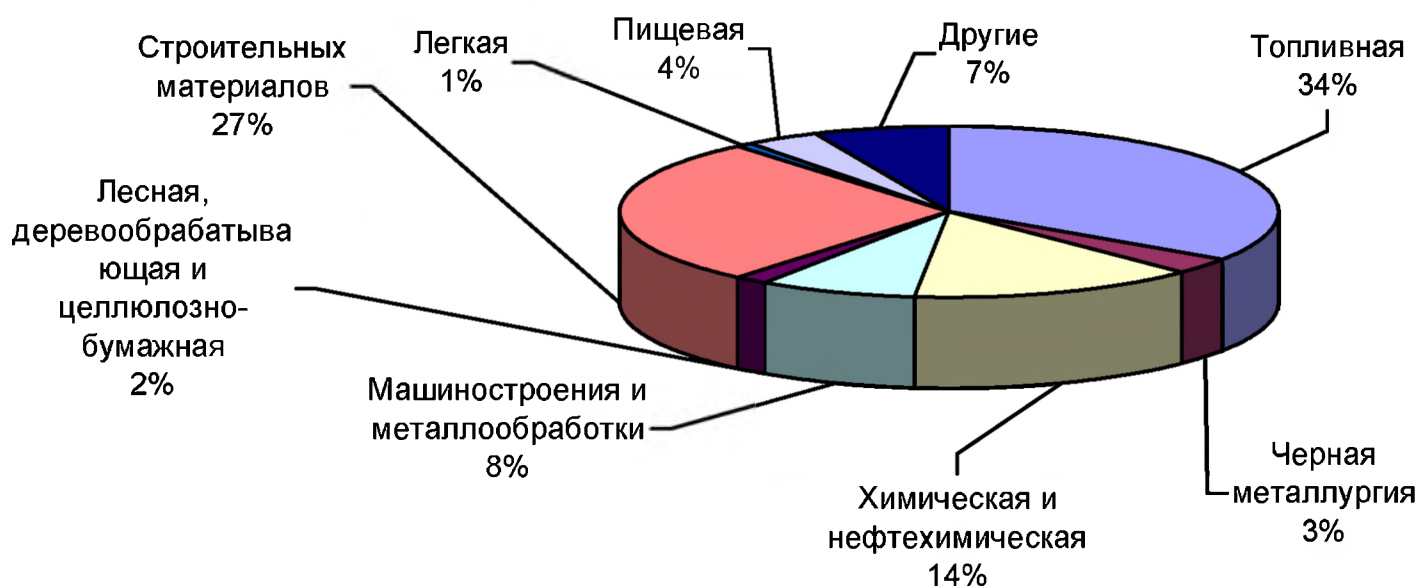


Рис.1.16. Структура потребления непосредственно топлива по отраслям промышленности на технологические нужды

Наконец, в индустрии строительных материалов топливная составляющая энер-

гопотребления (рис.1.17 – 1.18), близка к среднему значению ее для промышленности (рис.1.19 – 1.20), но температурный уровень теплотехнологической обработки

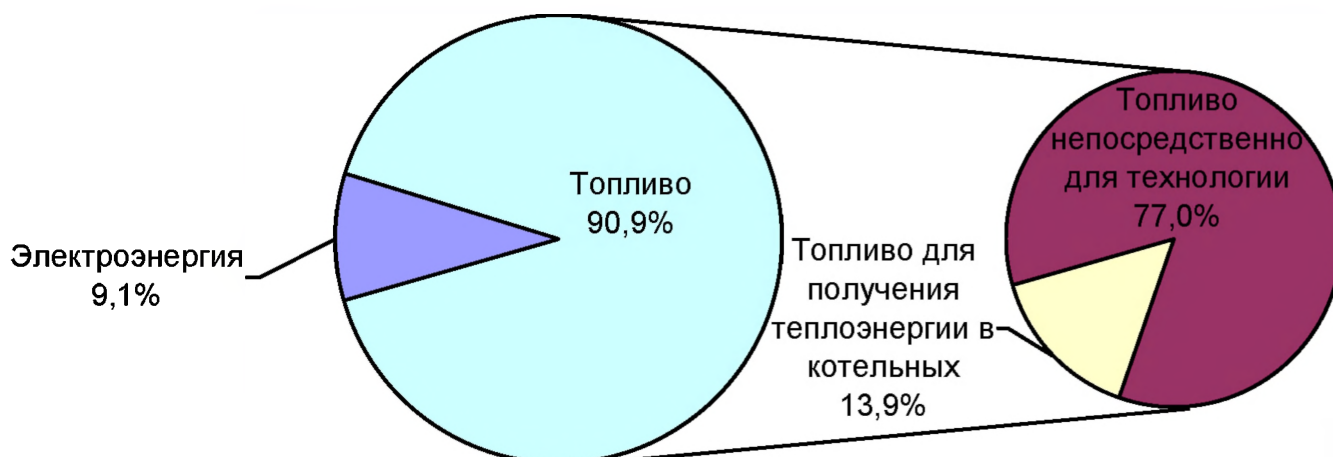


Рис.1.17. Структура энергопотребления отрасли строительных материалов

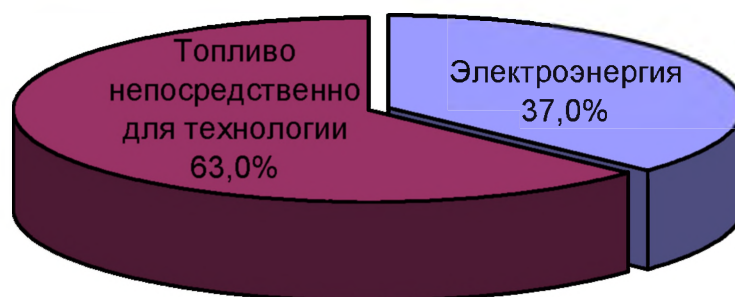


Рис.1.18. Структура энергопотребления в отрасли строительных материалов непосредственно в технологических процессах

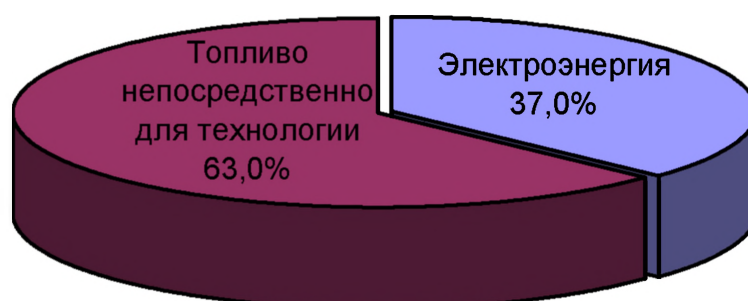


Рис.1.19. Структура энергопотребления в промышленности непосредственно в технологических процессах (без электроэнергетики)

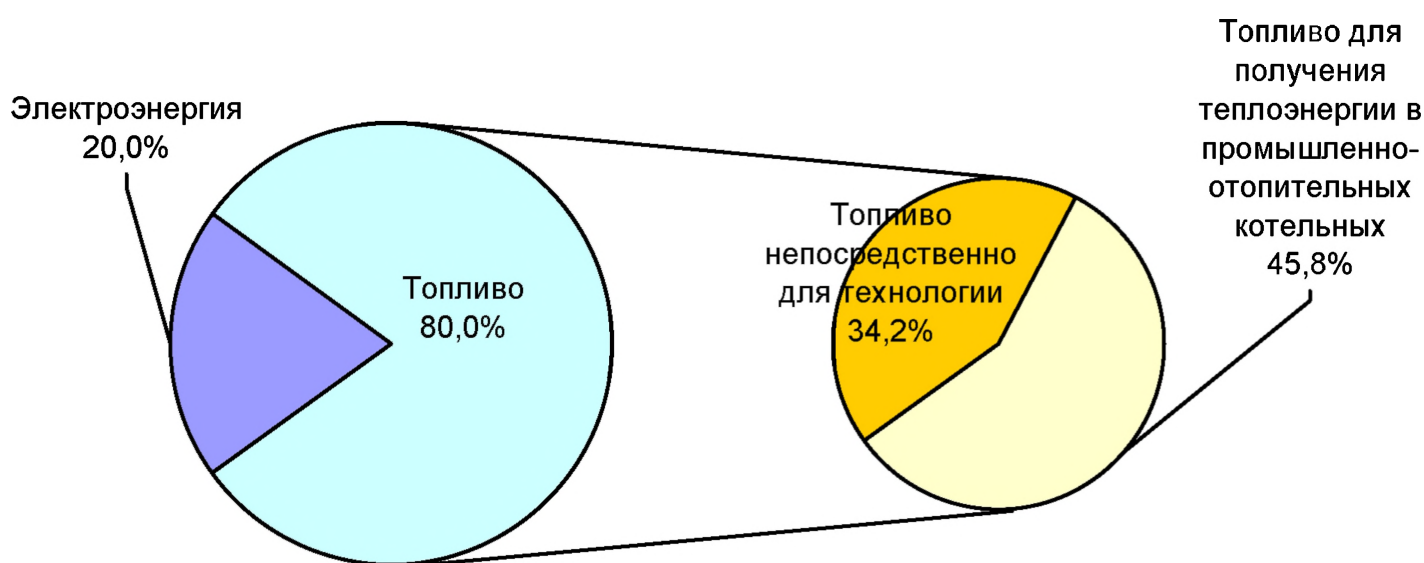


Рис.1.20. Структура энергопотребления в промышленности РБ (без электроэнергетики)

относительно невысок. При этом, по ряду причин, теплоэнергетическая система соответствующих производственных предприятий построена весьма упрощенно. Все это в совокупности делает возможным кардинальное снижение удельного расхода энергии за счет энерготехнологической реструктуризации производства на базе положений второго закона термодинамики. Последнее объясняется многими причинами, среди которых отметим следующие:

- в силу энергетических свойств электроэнергии, для систем потребляющих ее, энергобаланс, в ряде случаев, позволяет получить объективную картину качества энергопотребления. Анализ таких технологических систем на базе первого закона термодинамики вполне объективен. Для топливопотребляющих систем картина иная: промахи организации энергопотребления выявляются со всей определенностью при совместном рассмотрении балансов энергии и эксергии, чего, как правило, не делалось. Потому введение в анализ дополнений в виде баланса эксергии для теплотехнологических систем особенно плодотворно;

- по ряду других причин тепло- и топливопотребление в промышленности, в основном, организовано много хуже, чем электропотребление, что создало предпосылки для более заметного снижения энергопотребления именно в отношении неэлектрических форм энергии.

Заканчивая характеристику энергопотребления в промышленности, следует отметить общую для всех предприятий особенность: при создании существующих технологий целевая функция процесса оптимизации связывалась с расходом сырья и пр., но абсолютно не учитывала энергозатраты на всех этапах производственного цикла. В то же время, как вытекает из рис.3.1, основные показатели системы, в том числе и энергетические, закладываются на начальных стадиях существования системы и для исправления положения требуются очень серьезные изменения в ее структуре, связанные с переконфигурацией оборудования, что подчас невозможно или требует больших затрат. Тем не менее, энергосбережение в промышленности при одинаковом эффекте в 3-4 раза дешевле, чем разработка новых топливных месторождений, а в условиях РБ - безальтернативно.

2. Управление энергоиспользованием на производственном предприятии

2.1. Общие сведения

Энергия является одним из важнейших ресурсов, который до последнего времени, к сожалению, на предприятиях РБ таковым не считался. Исторически сложилось так, что ее использованию не уделялось должного внимания. Соответственно складывались отношения между производственными службами, распределялись права и обязанности. Формально сегодня произошло признание энергии дорогостоящим ресурсом. Вместе с тем, еще нет заметного изменения в отношении людей к энергоиспользованию. Требуется достижение понимания, в первую очередь, руководящего звена, что для действительно эффективного использования этого дорогостоящего ресурса необходима кропотливая управленческая работа. Осознание важности этой работы является первым шагом на пути энергосбережения на предприятии. Подходы к энергетическому управлению могут быть различными. Выбор зависит от сочетания многих факторов, прежде всего, индивидуального состояния предприятия и достигнутого уровня энергетического управления на нем. Вместе с тем, обязательным является достижение и сохранение контроля над энергопотреблением, и инвестирование мероприятий по изменению энергопотребления.

Неформальная бесконтрольность потребления энергии недалекого прошлого, безусловно, должна быть преодолена. На этом пути, прежде всего, необходимо получить структуру энергопотребления на предприятии. Она позволит выявить как основных потребителей энергии вообще, так и отдельных ее носителей и форм, в частности. В результате, как правило, происходит оценка использования альтернативных первичных энергоресурсов, энергетического и технологического оборудования и сложившихся методов управления им, проводимых кампаний по энергосбережению. Кроме того, в ходе данного этапа работ выявляются беззатратные и малозатратные пути энергосбережения, связанные с устранением очевидных издержек прошлого отношения к использованию энергоресурсов.

Следующий шаг связан с мероприятиями, требующими существенных затрат, и мероприятиями по защите этих затрат. Без мер по защите вложений ситуация на предприятии может стать еще более плачевной в сравнении с тем, что была до попы-

ток улучшения энергопотребления. Второй попытки добиться будет несравненно сложнее.

В соответствии с возможностями предприятия необходимо ранжировать предполагаемые мероприятия с учетом их эффективности и стоимости. При этом не следует думать, что здесь будет достигнуто ситуация, в которой положение можно считать благополучной. Новые, непрерывно появляющиеся технологии энергообеспечения производственных процессов будут требовать дополнительных вложений денежных средств. В этой связи, прежде всего, необходимы шаги по созданию информационной системы энергетического управления, обеспечивающей оперативную, всеобъемлющую информацию для всех звеньев, которым она необходима. *Требуется постоянная поддержка руководства мер по привлечению квалифицированного энергетического персонала, соответствующего финансированию работ, динамического отслеживания ситуации, в том числе и в вопросах новых технологий энергообеспечения материального производства.* В этой ситуации целесообразность энергетического управления становится очевидной. Конкретное количество людей, привлекаемое к его выполнению, зависит от ряда факторов: доли энергетической составляющей себестоимости продукции предприятия и необходимой величины ее уменьшения, стадии энергетического управления на предприятии, располагаемых средств. Очевидно, что с течением времени требуемое число сотрудников будет изменяться, но на всех стадиях необходимо ответственное лицо – энергетический управляющий. Задачи и обязанности его на первоначальном этапе следующие:

1. Формулирование и выполнение энергетической политики.
2. Сбор и ведение информации об энергопотреблении и выбросах в окружающую среду.
3. Регулярное информирование руководства и всех лиц, ответственных за энергопотребление, о текущей ситуации.
4. Контроль выгодности приобретения энергоресурсов и их расходования.
5. Информация о проблемах энергетики для всего предприятия.
6. Внедрение эффективной эксплуатационной практики, разработка и отслеживание соответствующих административно-хозяйственных мероприятий.
7. Распространение опыта энергосбережения.

8. Выявление и экономическое обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности.
9. Разработка инвестиционной программы по снижению энергопотребления и загрязнения окружающей среды.
10. Введение и сопровождение процедур оценки экономической эффективности мероприятий энергетического управления.

2.2. Вопросы энергетического управления.

Вопросы энергетического управления включают:

- 1) отслеживание текущего состояния энергетического управления;
- 2) энергетическую политику, состоящую в создании официальной заинтересованности в энергетическом управлении на предприятии;
- 3) организационные вопросы по неформальному внедрению во все управленческие структуры предприятия энергетического аспекта;
- 4) развитие мотивации: стимулировать энергосбережение у потребителей энергии и создать эффективные взаимоотношения с ними;
- 5) создание эффективной информационной системы;
- 6) пропаганду и рекламу энергетического управления на всех этапах технологического цикла;
- 7) выбор проектов и обоснование вложений в изменение эффективности энергоиспользования;
- 8) возможные варианты финансирования мероприятий.

Для систематизации данных по состоянию энергетического управления может быть использована, так называемая, матрица энергетического управления (таблица 2.1). В столбцах матрицы отражаются основные вопросы энергетического управления: политика, организация, мотивация, информационное обеспечение, пропаганда и реклама энергетического управления, инвестирование. Строки матрицы соответствуют уровню подходов к решению вопросов энергетического управления:

Таблица 2.1.

Матрица энергетического управления

		Вопросы энергетического управления					
		1. Энергетическая политика	2. Организация	3. Мотивация	4. Информационные системы	5. Пропаганда и реклама	6. Инвестиции
Уровни подхода к решению вопросов энергетического управления	4	Энергетическая политика, план действий, регулярный анализ являются частью общей стратегии предприятия, поддерживаемой его высшим руководством.	Энергетическое управление интегрировано в структуру управления предприятия. Четко определены обязанности структур и лиц по энергосбережению	На всех уровнях регулярно используются как официальные, так и неофициальные каналы взаимодействия энергетических служб и энергетического управления	Всеобъемлющая система устанавливает цели, следит за потреблением, фиксирует нарушения, определяет количественно экономию и расходы	Внутри предприятия и вне его пределов регулярно рекламируются показатели энергетической эффективности и энергетического управления	Инвестиции осуществляются приоритетно в экологически безопасные системы во всех вариантах модернизации и нового строительства
	3	Энергетическая политика оформлена официально, но высшее руководство не проявляет заинтересованности в ее реализации	Лицо, осуществляющее энергетическое управление, контролируется комитетом по энергетике, представляющим всех потребителей, возглавляемый членом высшего руководства предприятия	Комитет по энергетике используется в качестве основного канала наряду с прямыми контактами с основными потребителями	Отчеты всех подразделений основываются на непосредственных измерениях, но информация о ситуации не доводится до потребителей	Существует программа и регулярные рекламные кампании для повышения у персонала осознания значимости вопросов энергосбережения	Инвестиции производятся исходя из тех же критериев, что и все другие вложения
	2	Существует энергетическая политика, установленная энергетическим управлением предприятия, однако она не узаконена официально.	Существует должность, осуществляющая энергетическое управление, контролируется специальным комитетом. Механизм управления и полномочия неясны.	Связь с основными потребителями через специальный комитет, возглавляемый старшим управляющим подразделением	Энергетические показатели используются в разработке бюджета. Отчеты основываются на показаниях приборов коммерческого учета	Обучаются некоторые специально выделенные сотрудники	Инвестиции производятся только по критерию малого срока окупаемости
	1	Набор рекомендаций не оформленный в письменной форме	Энергетическое управление возложено на кого-либо с ограниченными возможностями и влиянием как одна из задач	Контакты между специалистами и отдельными потребителями на неофициальном уровне	Отчеты по затратам основаны на счетах энергопоставщиков. Отчеты для внутреннего использования собираются в техническом отделе.	Неофициальные контакты используются для пропаганды энергосбережения	Внедряются только малозатратные мероприятия
	0	Нет определенной политики	Энергетическое управление или какая-либо персональная ответственность за энергопотребление отсутствуют	Нет взаимодействия с потребителями энергоресурсов	Нет неформального учета энергопотребления. Нет информационной системы.	Нет пропаганды энергосбережения	Нет вложений в повышение энергоэффективности производства

от низшего нулевого до высшего четвертого. Ячейки, отображающие состояние дел по энергетическому управлению на предприятии, соединяются линией, получившей название "организационный профиль" предприятия. Для получения наибольшего эффекта от вложений, работы по энергетическому управлению желательно вести так, чтобы эта линия на каждом этапе была ближе к горизонтальной прямой и, в конечном итоге, достигла верхнего уровня. Сопоставление линий организационного профиля в разные моменты времени способствует получению объективной оценки динамики энергетического управления на предприятии, основным аспектом которого является изменение отношения к энергоиспользованию всего персонала без исключения.

Актуальным вопросом энергетического управления является выработка и официальное оформление энергетической политики, доведение ее положений до каждого работника и разъяснение важности их реализации в каждом подразделении предприятия. Лишь при таком подходе возможна оценка деятельности служб и персонала в отношении энергоиспользования и, что немаловажно, преемственность приоритетов с течением времени, финансирование и организация работ по энергетическому управлению. Разработка энергетической политики должна осуществляться управляющим по энергетике с участием всех заинтересованных сторон. Последнее зависит от отношений сложившихся на предприятии, но вовлечение в форме консультаций в эту работу всех подразделений определенно будет способствовать ее успеху. Официальное оформление энергетической политики, во-первых, декларирует стремление предприятия к сохранению окружающей среды и энергии, во-вторых, создает рабочий документ для последовательного руководства практической деятельностью по энергетическому управлению. Ее возможное содержание может быть таким:

- 1) декларация заинтересованности руководства в энергетическом управлении;
- 2) цели ближние и на отдаленную перспективу;
- 3) изложение непосредственно энергетической политики;
- 4) план конкретных мероприятий и программа действий конкретных исполнителей с определенными сроками завершения работ;
- 5) необходимые ресурсы, персонал, его подготовка и обучение;

- 6) указание состава комитета по энергетическому управлению и его представителей в каждом подразделении, изложение его задач, структуры и механизма отчетности;
- 7) положение по оценке экономической эффективности достижений и вклада каждого работника.

Организационно управляющий по энергетике может относиться к таким структурам:

- 1) технический отдел;
- 2) отдел главного энергетика;
- 3) отдел кадров;
- 4) финансовый отдел;
- 5) управление исполнительного директора.

В каждом из вариантов имеют место свои достоинства и недостатки. В двух первых вариантах облегчена техническая сторона деятельности энергетического управляющего, но затруднена информационная и обучающая работа. Следующие два варианта соответственно облегчают обучающую и финансовую деятельность, осложняя ее техническую сторону. Последний вариант, достигает высокого уровня тех или иных инициатив, осложняя их внедрение в повседневную практику всех подразделений.

Статус и власть управляющего по энергетике достаточно ограничены, притом, что он должен распространять свою деятельность на все структуры предприятия. В этой ситуации необходима поддержка высшего руководства на всех уровнях и во всех формах.

Энергетический управляющий должен не реже раза в месяц отчитываться перед руководством подразделения, к которому принадлежит. Далее, при содействии руководства, он должен иметь возможность отчета раз в квартал перед комитетом, объединяющим все службы, и, наконец, через комитет ежегодно докладываться перед руководством предприятия.

Управляющий по энергетике на разных стадиях своей деятельности должен привлекать к работе специалистов по повышению энергоэффективности, соответствующей подготовке персонала применительно к конкретному производству, бухгал-

терской отчетности и оценке финансовых вложений, мотивации, стимулированию, пропаганде, рекламе.

Мотивация (создание у потребителя стимула для сбережения энергии, добровольного желания настойчиво преодолевать возникающие при этом трудности) - следующий важный вопрос энергетического управления. Опыт многих стран показывает, что никакие автоматизированные системы не решают задачи энергосбережения, если в этом нет заинтересованности людей, связанных с данной энергопотребляющей системой. Необходим достаточно сложный комплекс соответствующих мероприятий. Например, при его разработке надо помнить, что зачастую групповой стимул оказывается более действенным индивидуального, что в сознании людей энергосберегающий стимул сам по себе имеет весьма низкий приоритет, уступающий приоритету многих других поступков. Кроме того, развитая мотивация должна сопровождаться адекватным выходом в ожидаемом временном отрезке, иначе появляется недовольство и дискредитация идеи мотивации. Наконец, у различных групп людей, связанных с конкретной энергопотребляющей системой, существуют различные стимулы, соответствующие данной задаче.

Выделяют следующие основные группы, связанные с энергетическим управлением, имеющие различную мотивацию энергосбережения: высшее руководство, руководители подразделений, ключевой персонал, энергетические представители, прочий персонал.

Для высшего руководства важно увеличение производительности и рентабельности предприятия и энергетическому управляющему изменение именно таких статей надо доводить данной классификационной группе. Без этого трудно рассчитывать на необходимое финансирование энергосберегающих мероприятий. Надо отметить возможный уровень энергетической составляющей себестоимости, который мог быть в настоящее время без ранее принятых мер. Полезно определить относительный вес проведенных мероприятий в достигнутом результате. Для персонала этой группы важно считать, что достижения в энергосбережении являются их личными успехами, даже если это и является плодом коллективных усилий.

Руководители подразделений – следующая классификационная группа мотивационного комплекса. Эффективным средством создания энергосберегающего сти-

мула здесь может быть персональная ответственность за энергозатраты. При этом, многое зависит от того, что происходит с неизрасходованными в результате экономии средствами, изначально предназначенными на покрытие энергопотребности производства. Действенным является включение энергетического управления на равных правах в общую систему управления ресурсами и затратами. Данной группе требуется постоянная информация о ситуации в их подразделениях, а также средства для поощрения персонала своих подразделений за достигнутые успехи в энергосбережении.

Операторы установок (энергетических, технологических), наладчики, прочие группы обслуживания, ответственные за состояние энергопотребляющего оборудования и осуществляющие непосредственный контроль за работой установок, участков, цехов составляют группу ключевого персонала. Этой группе важно видеть конкретные результаты своих усилий в повышении энергоэффективности подсистем, с которыми они связаны. Самостоятельность персонала этой группы в планировании своей работы и загруженность в отношении выполнения основной задачи, связанной с предотвращением отказов оборудования, исключения нареканий пользователей и пр., весьма влияют на результаты энергосбережения. Здесь менее всего действуют директивы по снижению энергопотребления, весьма важны признание и поддержка со стороны вышестоящего руководства, финансирование, регулярные личные рабочие контакты, развитие удовлетворенности от своей деятельности в повышении энергоэффективности оборудования.

Энергетические представители с конкретной ответственностью за энергоиспользование, которые должны быть в каждом подразделении, нуждаются в постоянной поддержке в решении своей, часто достаточно неблагодарной задачи. Оперативность и эффективность рассмотрения их сообщений, снабжения достоверной и точной информацией, обучение и поддержка являются важными компонентами их мотивации.

Для прочего персонала важна общая обстановка на предприятии. Та или иная культура конкретного предприятия требуют соответствующего стиля управления: личные контакты, встречи или обсуждения, официальное управление, самостоя-

тельность и личная ответственность – все это требует индивидуального выбора в каждой конкретной системе.

Создание эффективной информационной системы – очередной вопрос энергетического управления. При этом информацией следует считать те данные, которые обработаны таким образом, при котором имеют значение для потребителя и позволяют принимать определенные решения. Ядром информационной системы остается традиционный целевой энергетический мониторинг, вместе с тем, информационная система должна не просто выдавать поток данных, а обрабатывать их должным образом, обеспечивать анализ и адаптацию к принятию информации соответствующего типа, проводить соответствующий мониторинг. Следовательно, следует заботиться о ясном понимании того, когда и какая информация требуется потребителю, кто является ее пользователем, какие объем и форма предоставления будет для него наиболее полезны. Совершенно необходимое свойство информационной системы – дружественное для потребителя сопровождение. Тип информации зависит от уровня принимаемых на ее основе решений: оперативный контроль, управленческий контроль, стратегическое планирование. Надо представлять, что, например, для оперативного контроля и для стратегического принятия решения, представления о корректном решении многих вопросов различны. Так, ни у кого не возникает сомнения в необходимости точности и своевременности получаемой информации. Если в случае оперативного управления требуются сведения с точностью до одних единиц измерения энергии (кДж, например), во втором случае более желательно иметь данные с точностью до единиц на несколько порядков больших (МДж, в том же примере). В обоих случаях, как правило, требуется сохранение одинаковой относительной ошибки при различной абсолютной ошибке. В случае оперативного контроля информация нужна немедленно лишь при неблагоприятном развитии событий. Для управленческого контроля информация требуется в форме отчета за заданный период. В случае стратегического контроля необходимо, кроме всего, прогнозировать информацию. Очевидно, что для получения наибольшего эффекта от внедрения информационной системы требуется:

- 1) установить пользователей и при их участии оценить потребность в информации.

Последнее следует делать в письменной форме, что позволяет пользователю

лучше осмыслить свои потребности и исключает недоразумения между разработчиками и пользователями в части возможностей созданной системы;

- 2) выбор наиболее простого, адекватного целям системы способа ввода и вывода информации;
- 3) доказательность результатов в части необходимости повышения эффективности энергоиспользования;
- 4) способствовать формированию у пользователей обоснования расходов на содержание системы.

Для высшего руководства предприятия важно знать, сколько средств экономит энергетическое управление, сколько требуется вложений с малым сроком окупаемости в повышение энергоэффективности в следующем году, какие серьезные в отношении затрат энергосберегающие проекты и зачем нужны предприятию в обозримой перспективе. Эти вопросы, прежде всего, должны найти отражение в ежегодном отчете энергетического управляющего данной группе пользователей.

Руководителям подразделений, прежде всего ответственным за средства связанные с энергопотреблением данной технической системы, следует знать текущие показатели энергопотребления вверенной им подсистемы, их соотношение с требуемыми значениями. Этой же группе пользователей необходимо знать, как ключевой персонал управляет потреблением энергоресурсов той или иной установки. Форма и регулярность представления информации должны быть наиболее удобными для использования.

Ключевой персонал нуждается в сведениях об изменениях в энергопотреблении за ближайший период и их связи с условиями и результатами производственной деятельности: производительностью за рассматриваемый период, внешними факторами и т.п. Важно знать, все ли работает в штатном режиме, а также роль соответствующих проведенных мероприятий и их дальнейшее влияние. В этой связи энергоуправляющий должен научить персонал правильному пониманию сведений, поступающих от информационной системы, и должному их использованию.

Сотрудникам энергетического управления нужна, в том числе, внешняя информация для понимания мер, которые могли бы повысить энергоэффективность, а также их сроках окупаемости и пр.

Энергетическим представителям в подразделениях требуется знать эффект от их административно-хозяйственных энергосберегающих мероприятий, состояние энергопотребления и его изменение в данном подразделении.

Прочим сотрудникам необходимо представлять насколько эффективно работает предприятие и как изменилась ситуация с энергопотреблением.

Анализ данных проводится с помощью того или иного математического метода, например, регрессионного анализа. Выявляются характерные периоды, их показатели, отклонения фактических их значений от показателей прогнозируемых, причины отклонений. Полезно ту или иную информацию выводить в различных формах: графической, табличной или иной. Энергетическому управляющему целесообразно сопрягать отчетность по энергетическому управлению с финансовой отчетностью предприятия. Это облегчает оценку энергосберегающих мероприятий, повышает значимость энергетического управления.

Пропаганда и реклама энергетического управления, общение с людьми, использующими услуги энергетического управляющего, объединяет понятие маркетинга. Это, хотя и не основное занятие энергетического управляющего, но важная составляющая его работы. Она включает:

- углубление знаний о важности энергоэффективности в отношении расходов предприятия, в отношении окружающей среды;
- рекламу услуг энергетического управления на предприятии;
- пропаганду достижений предприятия в энергосбережении и управлении последним за пределами предприятия.

Опять же, как и предыдущие вопросы энергетического управления, маркетинг должен быть избирателен в зависимости от групп сотрудников, для которых предназначен. Во всех случаях первым шагом является идентификация групп, вторым – действия по стимулированию и убеждению в необходимости следования советам и применения передовых теории и практики энергетического управления.

Энергетический управляющий должен постоянно искать как возможности внедрения энергосберегающих мероприятий, так и дифференцированные способы влияния на людей, формальные и неформальные. Роль энергетического маркетинга в этом весьма велика, поскольку он выявляет что можно сделать для конечных по-

требителей услуг энергетического управления. Что предоставить потребителям в настоящее время? Чего они хотят? Нужна ли им информация о неэффективности энергоиспользования и причинах этого, или информация о соотношения энергетических расходов с реальным бюджетом? Нужны ли потребителю графики потребления энергоресурсов по месяцам за последние годы? Какую пользу они извлекают или не извлекают из этого? Регулярные дискуссии, семинары, беседы и пр., дифференцированные по уровням каждой группы, должны служить повышению осознания людей важности этой стороны производственной деятельности. Короткая публикация о достижениях предприятия в повышении эффективности энергоиспользования способствует привлечению средств со стороны для финансирования тех или иных энергосберегающих мероприятий.

На маркетинг должно тратиться до 20% ресурсов энергетического управляющего, в том числе 5 – 10% финансовых. Полезно планировать стратегию маркетинга, что связано с попыткой установления цели и определения ориентиров на пути. План этот не требуется делать большим - до одной страницы. Например, он может быть таким:

Анализ энергетического управления.

1. Кто потребляет услуги?
2. Какие услуги получают потребители в настоящий момент?
3. Можно ли расширить услуги энергетического управления?
4. Можно ли расширить список потребителей маркетинга?
5. Как оплачиваются затраты на услуги?

Стратегия энергетического управления.

1. Цели и их количественное определение.
2. Пути достижения целей (личные контакты, выступления, беседы).
3. Сроки реализации.
4. Затраты ресурсов (временные и материальные).
5. Финансирование и обоснование деятельности у руководства предприятия.

Инвестирование является центральным вопросом при решении многих проблем. Прежде всего, решение вопроса инвестирования связано с рядом аспектов, прежде всего, с необходимостью учета эффективности функционирования предприятия и с

необходимостью учета взаимоотношений предприятия с местным регионом. Наконец, необходим системный подход к инвестированию. Требуется совместное рассмотрение таких факторов, как абсолютное и удельное энергопотребление, текущее состояние оборудования и всей инфраструктуры предприятия, условия работы персонала, экологические проблемы и др. В большинстве случаев потребности в инвестициях превышают возможности предприятия. Общеизвестно, что, прежде всего, следует вкладывать средства в мероприятия с наибольшей отдачей. В этой связи, следует обратить внимание на наиболее энергоемкие процессы и подсистемы, что сулит наибольшую выгоду. Далее необходимо ответить на ряд вопросов связанных с разрабатываемой конкретной проблемой. В отношении энергетических мероприятий, прежде всего, требуется отразить:

- текущие энергетические проблемы;
- мероприятия (технические и административные), внедрение которых может уменьшить потери;
- ожидаемый срок возврата вложений. Энергетические мероприятия в этом отношении весьма неэффективны. В контексте этого следует к оценке привлекать не только прямую финансовую выгоду от снижения энергопотребления, но и другие преимущества, вытекающие из соответствующих инвестиций. Следует применять более совершенные методы оценки по дисконтированному потоку средств, внутренней ставке возврата или по чистой текущей стоимости.

Очевидно, что технические мероприятия и необходимые соответствующие инвестиции не могут подменять эффективного контроля над энергопотреблением на предприятии. В этой связи, инвестициям должно предшествовать безусловное обеспечение наилучшего функционирования существующих энергопотребляющих подсистем и соответствующего исполнения своих обязанностей ключевым персоналом.

Важен выбор момента для проведения мероприятий. Беззатратные мероприятия должны внедряться немедленно без каких-либо задержек. Мероприятия с малым сроком окупаемости, которые работают в течение всего года, следует внедрять как можно раньше в отчетном периоде. Те же мероприятия, но имеющие сезонную составляющую, должны внедряться до начала периода в котором может быть получе-

на экономия. Наиболее удачно совместить момент проведения энергосберегающих мероприятий с той или иной модернизацией предприятия. Это существенно снижает объем инвестиций. В этой связи следует ввести в практику предприятия обязательную неформальную энергетическую экспертизу всех, без исключения, проектов реконструкции, обновления или иных изменений. Выполнять ее должны системные специалисты по энергообеспечению технологий конкретной отрасли. Немаловажным моментом является практика защиты инвестиций обеспечением должной эксплуатационной практики, технического обслуживания. Без этого неизбежно будут утрачены преимущества и, как следствие, дискредитация энергосберегающих мероприятий.

Финансирование самого энергетического управления на предприятии требует специальной проработки. Система энергетического управления, как правило, финансово не самообеспечивается. Ее финансовая основа краткосрочна и ненадежна, с постоянной угрозой сокращения, например, под влиянием смены приоритетов. Здесь важны ответы на такие вопросы как: 1. Что является источниками финансирования энергетического управления в краткосрочной и долгосрочной перспективах? 2. Куда будет направляться экономия в указанные периоды?

Энергетическое управление по своей природе является долгосрочным проектом, лишь в этом случае оно дает реальный эффект. Существует несколько вариантов финансирования энергетического управления:

- 1) из центрального бюджета;
- 2) из бюджета того или иного подразделения, например, технического отдела;
- 3) удержанием доли полученной экономии;
- 4) оплатой услуг энергетического управления службами, нуждающимися в них.

Реализация одного из перечисленных вариантов финансирования в чистом виде или их разумном сочетании может быть лишь в начальный период, далее неизбежен вопрос о распределении экономии, полученной в результате деятельности энергетического управления. Наиболее перспективно при распределении экономии выделить определенную часть прибыли каждой из заинтересованных сторон, что усилит мотивацию энергетического управления у всего персонала предприятия. Кроме обеспечения независимости и долговечности энергетического управления в этом вариан-

те финансирования, подразделения предприятия почувствуют отдачу от их усилий на его поддержку. Общая сумма затрат на энергетическое управление не должна быть ниже 10% годовых затрат на энергию и, в любом случае, обеспечивать защиту сделанных инвестиций в энергоэффективность.

2.3. Энергетическое обследование предприятия

Энергетическое обследование (ЭО) является важной составляющей энергетического управления, которая дает картину энергопотребления в тот или иной период функционирования предприятия. Основной целью ЭО является:

- 1) анализ существующих систем энергоснабжения;
- 2) анализ эффективности энергообеспечения теплотехнологий;
- 3) количественное определение объемов энергопотребления;
- 4) оценка эффективности использования энергоресурсов на предприятии;
- 5) разработка частных и полного энергобалансов предприятия за характерные отрезки времени;
- 6) определение основных потребителей энергоресурсов и структуры энергопотребления;
- 7) определение потерь энергоресурсов (количественная оценка и структура потерь);
- 8) выявление нерационального использования энергоресурсов;
- 9) разработка средне- и ближнесрочного энергосберегающего проекта.

Энергетическое обследование достаточно дорогостоящее мероприятие, что предполагает продуманность времени его проведения и целесообразности выполнения в данный момент.

Одним из обязательных условий успешного проведения ЭО является его выполнение квалифицированными специалистами, прежде всего, в области промышленной энергетики, владеющими не только теоретическими, но и специальными экономическими, управленческими знаниями и вопросами охраны труда. Глубокие знания специального оборудования и режимов его работы на предприятии желательны, но главное заключается в понимании технологических процессов, взаимосвязи технологических и энергетических потоков, в наличии системного подхода к вопросам

энергетического обеспечения технологических процессов вообще и теплотехнологических в частности, во владении современными методами анализа технических систем. (Наиболее прогрессивно мыслящие руководители отраслей создают для этих целей группу системных специалистов, имеющих базовое образование по специальностям промышленная теплоэнергетика и электроснабжение предприятий, адаптировавших специальные знания применительно к технологическим процессам отрасли.) Важно наличие у исполнителей таких общечеловеческих качеств как:

- общительность;
- умение расположить собеседника;
- настойчивость;
- однако, ключевым следует считать нестандартное мышление, поскольку подход "как там" или "так везде" чаще всего не означает оптимальности.

Для принятия лучших решений необходим дифференцированный подход к анализируемой системе и условий ее сопряжения с внешней средой. Так что выбор специалистов для проведения ЭО во многом определяет его результаты.

Оформление результатов, как правило, позволяет судить о качестве работы. Отчет должен иметь разнообразные формы представления результатов (таблицы, диаграммы, схемы, аналитические зависимости и пр.), содержать должное количество специальных диаграмм с изображением протекающих в той или иной системе процессов, должен быть выдержан в одной системе единиц измерения физических величин. В частности, потоки энергии связанные с материальными носителями и не связанные с потоками вещества следует определять (хотя бы в конечном итоге) в одних единицах. Сегодня весь цивилизованный мир использует систему СИ для измерений физических величин, которая предусматривает для этой цели: джоуль (Дж), килоджоуль ($1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}$), мегаджоуль ($1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$), гикаджоуль ($1 \text{ ГДж} = 10^9 \text{ Дж}$), тетраджоуль ($1 \text{ ТДж} = 10^{12} \text{ Дж}$). Энергетические и эксергетические балансы (важный этап ЭО) более наглядны, если наряду с табличной формой представления информации используется и графическая в виде диаграмм общего назначения или, еще лучше, специальных диаграмм Сэнки и Грассмана.

Удельные расходы энергии не являются объективной оценкой эффективности энергоиспользования, что общеизвестно. Особенно для предприятий, где по тем или

иным причинам измеряется валовой выпуск продукции в условных единицах. Они лишь позволяют проследить (тем не менее, не всегда) изменение подходов и результаты работ в направлении энергосбережения за тот или иной промежуток времени. Энергетический КПД применим лишь к небольшому числу систем преобразования энергии, а к открытым системам преобразования вещества он неприменим. Объективной оценкой, сегодня с этим соглашается большинство специалистов, эффективности использования энергии в той или иной системе является эксергетический КПД протекающих в ней процессов. Однако, как и любой инструмент, эксергетический анализ требует освоения, создания соответствующей инфраструктуры. Сегодня к его проведению только начинают подходить соответствующие специалисты.

В РБ Государственным комитетом по энергосбережению и энергетическому надзору разработано положение, где, кроме всего прочего, регламентировано содержание отчета энергетического обследования предприятия. Можно соглашаться или нет с ним, но, прежде всего, следует выполнять ЭО в соответствующем объеме или превышающем его (для несогласных). Сделан важный шаг в изменении ситуации с энергопотреблением в стране, который, и это естественный процесс, с течением времени требует дальнейшего развития. В указанном положении определена периодичность проведения энергетического обследования предприятий и уровень энергопотребления, при котором ЭО обязательно.

Вместе с тем, само по себе энергетическое обследование (получившее название энергетический аудит) не решает всех проблем. Чаще всего, о нем быстро забывают, поскольку существует серьезный барьер в реализации проектов и поддержании должного уровня энергоиспользования. Требуется непрерывное, активное ЭО, т.е. система мер, в которой энергетический аудит будет означать вехи, знаменующие завершение одних этапов и начало других в улучшении энергоиспользования на предприятии. Такая система мер, дающая возможность контроля, в широком смысле, над использованием энергоресурсов и, в конечном итоге, приводящая к общему уменьшению производственных затрат, получила название целевого энергетического мониторинга. Она многоуровневая, содержащая набор составляющих, среди которых некоторые являются обязательными:

- 1) оплата ежемесячная счетов за энергоресурсы и сверка счетов с показаниями коммерческих счетчиков;
- 2) регулярное (ежемесячное) сопоставление выхода продукции или иной целевой функции с энергопотреблением;
- 3) отчет (еженедельный) о потреблении энергоресурсов отдельными подразделениями посредством системы приборного учета и сопоставление его с выходом продукции;
- 4) определение целевых показателей энергопотребления и сопоставление их с уровнями целевого потребления для данной подсистемы;
- 5) создание неформальных групп координирующих и разрабатывающих пути реализации мероприятий установленных в результате ЭО;
- 6) создание механизма обратной связи на всех уровнях предприятия, что повышает осознание и мотивацию энергосбережения.

Целевой энергетический мониторинг дает до 15% прямой экономии, косвенно он улучшает финансовую отчетность, качество продукции, уточняет себестоимость. Сложность его введения различна для различных производств, эффективность зависит, прежде всего, от культуры управления и профессионализма всех исполнителей.

3. Теоретические основы энергосбережения

3.1. Общие положения

Проблему энергосбережения необходимо разделять на две составляющие. Первая связана с созданием и внедрением энергосберегающих технологий и, как правило, не относится к компетенции промышленных энергетиков, а является прерогативой специалистов-технологов. Вторая составляющая связана с эффективным энергообеспечением выбранной теплотехнологии, независимо от того энергосберегающая она или не очень. Выполнить работы по решению проблемы эффективного энергоиспользования призван системный специалист, владеющий вопросами промышленной теплоэнергетики и глубоко понимающий данную технологию. Группа таких системных неформальных специалистов в каждой отрасли должна определять политику эффективного энергообеспечения специфических теплотехнологий отрасли. Рассмотрению вопросов связанных с решением этой задачи и посвящена данная работа.

“Энергосбережение, экономия энергии” – привычные, широко применяемые в производственной сфере слова. "Но позвольте - может сказать любой образованный человек - есть основной закон природы, утверждающий что энергия сохраняется и не уничтожается. Зачем беречь энергию, если природа сама так хорошо это обеспечивает? И как можно энергию добывать и производить?" Ответ на эти непростые вопросы дает термодинамика. При ответе на прозвучавшие вопросы необходимо разобратся с перемещением энергии в пространстве, с потерей потоком энергии способности производить работу при переходе от одного энергоносителя к другому.

Научно-технический прогресс позволяет и электроэнергию, и теплоту получать из различных источников. Потребителю чаще всего безразлично как получена энергия. Безразлично это для страны, поскольку РФ не располагает промышленно значимыми запасами энергоресурсов, их приходится экспортировать, что требует колоссальных валютных расходов.

Особую важность имеет правильный выбор источников энергии для данных времени и места. Обеспечить теплоснабжение от котельной, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) или теплового насоса? На каком топливе проектировать работу тепловой

электростанции или котельной? Где, когда и какие строить либо реконструировать электростанции? Если реконструировать, то с каких начинать и в каком порядке? Подобные вопросы являются определяющими при создании системы энергоснабжения любого объекта. Денежный критерий в строительстве долгосрочных объектов тем менее надежен, чем больший срок эксплуатации объекта предполагается. Типичный пример - перерасход энергии нашими промышленными предприятиями, жилыми и общественными зданиями достигает 50 – 100%, так как в момент их проектирования и строительства имели место заниженные цены на первичные энергоресурсы. В той ситуации выгодно было экономить прочие ресурсы (материалы, время, трудозатраты, ориентироваться на неквалифицированные кадры и пр.) за счет перерасхода энергии. Однако подобная экономия оказалась иллюзорной и сегодня, по истечении достаточно длительного периода с момента ввода объектов, со всей остротой стоит задача коренного снижения энергопотребления на единицу продукции. Но объекты, о которых идет речь, по многим причинам крайне трудно модернизировать, а в ряде случаев и невозможно. Очевидность недопустимо высокой цены ошибок принятия начальных решений требует в данном вопросе привлечения термодинамики на помощь экономике. Законы последней стабильны, не зависят ни от каких теорий и конъюнктурных факторов. Здесь оказываются необходимыми, пока для многих незнакомые, понятия «эксергия», «эксергия-нетто» и «энергия-нетто». Они необходимы всегда при рациональном управлении любой энергопотребляющей системой и знакомство с ними чрезвычайно актуально в сегодняшней ситуации, когда обстоятельства требуют коренного изменения отношения к энергетике вообще и промышленной энергетике в частности.

Наиболее просто для восприятия понятие «энергия-нетто», под которой понимается разница между энергией произведенной за установленный период времени и энергией, затраченной на строительство объекта и его эксплуатацию, а также на получение материалов, пошедших на создание объекта (прошлые затраты). Очевидно, лишено смысла создание объектов энергоснабжения, на строительство которых требуется больше энергии, чем они произведут за свой срок службы. К таковым сегодня относятся ряд объектов трансформирующих энергию, так называемых, возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Основные трудности использования ВИЭ

имеют место из-за низкой плотности притока энергии солнца и ветра, что приводит к резкому увеличению размеров оборудования, а следовательно, к большим затратам энергии на выработку необходимых конструкционных материалов. Вся бестопливная энергетика, все ВИЭ, если они включаются в энергетический комплекс, должны удовлетворять естественному условию: давать экономию топлива большую, чем его затраты на создание установки на базе ВИЭ. В противном случае строительство такой установки бессмысленно. Естественно, что небольшие энергоустановки в тех районах, где нет соответствующей инфраструктуры, этому условию могут не удовлетворять. Отмеченное не должно останавливать поиски путей увеличения масштабов использования ВИЭ, но вышеуказанный критерий будет оставаться для них основным. В будущем, естественно, этот вопрос будет разрешен, сегодня ведутся большие работы в ряде стран, но на данном этапе использование ВИЭ для условий РБ весьма проблематично.

Проблема выбора критериев для принятия решений при создании той или иной долговременной системы должна рассматриваться через призму, преломляющую связь различных этапов жизни объекта с возможностями изменения его энергетических показателей. Необходимо обратить внимание на сильную зависимость между стадиями создания и существования технической системы и перерасходом энергоресурсов, на который можно повлиять на данной стадии. На рис. 3.1 приведена графика-

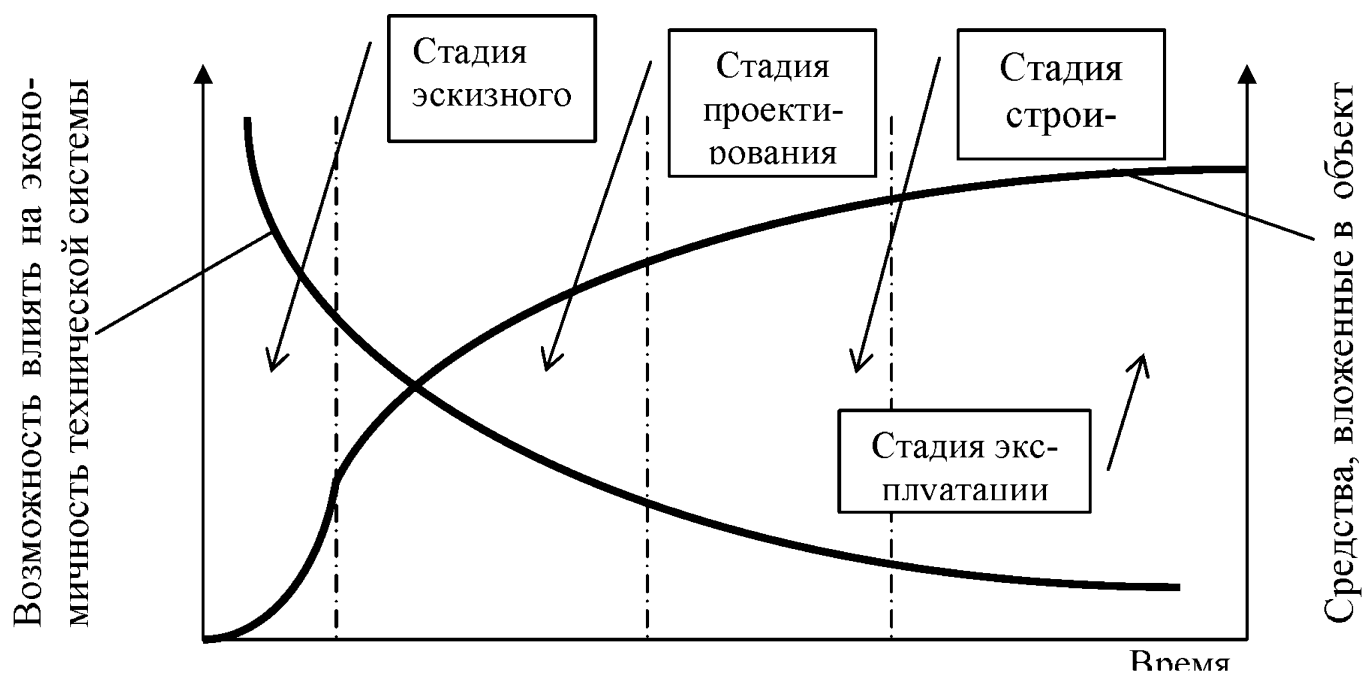


Рис.3.1. Изменение средств, вложенных в объект, и возможности влиять на его показатели на различных стадиях существования технической системы (ТС)

ческая зависимость, иллюстрирующая характер связи.

Количественно влияние основных этапов на величину всех потерь приближенно выглядит так: стадия эскизной проработки – 40%; стадия проектирования и строительства – 40%; стадия эксплуатации – 20%. При всем естественном разбросе веса означенных выше этапов для конкретных объектов, приведенная зависимость дает представление о том, что можно ожидать от работ по энергосбережению или о том, какой объем работ необходим для достижения желаемого уровня показателей.

3.2. Энергетический баланс и энергетические характеристики

Основным документом для анализа энергопотребления той или иной технической системы, того или иного технологического процесса был и остается энергетический баланс, дающий картину целевого потребления энергии всех видов. На основе анализа энергобаланса производится оценка фактического состояния и структуры энергоиспользования технической системы. Определяются потоки рассеиваемой энергии. Последние принято называть потерями энергии (статьями потерь), что не адекватно закону сохранения энергии, и термин «потери энергии» здесь надо понимать как профессиональный сленг. Выявляются причины возникновения потерь энергии и разрабатываются мероприятия по их снижению.

При всей бесспорной значимости энергобаланса надо помнить, что он базируется только на первом законе термодинамики (см. ниже) и отражает лишь количественную сторону энергетических превращений, протекающих в технологическом процессе, а потому не может дать объективной и полной термодинамической оценки преобразования энергии. По этой причине, на основе только баланса энергии, нельзя определить пути энерготехнологического совершенствования производственных процессов, для выявления которых необходимо применять второй закон термодинамики (см. ниже).

Достаточно широко распространено мнение, что материальные изменения, представляющие сущность того или иного технологического процесса, являются главными. Однако, на самом деле, основой всех материальных превращений являются превращения энергии, по законам которых протекают химические реакции,

связанные с ними. Поэтому термодинамические особенности технологического процесса, т.е. способность системы избирательно воспринимать энергию, подводимую к ней в ходе протекания процесса, объясняют, почему энергия одного качества потребляется, другого – отвергается. Игнорирование данного факта дает жизнь далеко не лучшим структурным схемам набора оборудования для обеспечения теплотехнологических процессов, которые принципиально не могут обеспечить эффективное энергоиспользование. Это обосновывает необходимость изучения, как процессов преобразования вещества, так и вызвавших их процессов преобразования энергии. Разработка методов подобных исследований и входит в задачу термодинамики.

Термодинамика – наука о наиболее общих свойствах макроскопических объектов (термодинамических систем), находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамическая система (ТС) представляет собой совокупность тел, способных энергетически взаимодействовать между собой и с другими телами и обмениваться с ними веществом. Все, лежащее вне ТС, относится к окружающей среде (ОС).

Термодинамика использует феноменологический метод исследования, который не предполагает рассмотрение природы и строения исследуемого объекта. В этом слабость феноменологической термодинамики. Однако, в этом и ее сила, поскольку установленные связи между макроскопическими величинами (давлением, температурой, энергией и пр.) и другими свойствами объекта, а также полученные выводы в результате такого подхода, оказываются фундаментальными, так как не связаны ни с какими теориями о строении вещества. Представление о строении вещества может изменяться, а выводы и соотношения феноменологической термодинамики, от него не зависящие, неизменны и верны в той мере, в какой справедливы основные положения и законы, лежащие в основании термодинамики. Последние получены в результате анализа и обобщения опытных фактов, накопленных человечеством. Огромное число опытных фактов позволяет придать полученным выводам статус законов. Их немного: два исходных положения и три начала (закона) термодинамики.

Первый закон термодинамики. Общепринятый баланс энергии ТС строится только основе первого закона термодинамики. Общий закон сохранения и превра-

щения энергии, конкретное выражение которого применительно к ТС заключает первый закон термодинамики, устанавливает постоянство суммы всех видов энергии изолированной системы.

От того, как ТС взаимодействуют с ОС, их разделяют на закрытые и открытые. К первым относят ТС, в которых отсутствует обмен вещества с другими системами, ко вторым – ТС, в которых между ними и окружением имеют место материальные потоки. Если ТС не может обмениваться ни энергией, ни веществом с другими системами, то она является изолированной.

Первый закон термодинамики включает в себя принцип эквивалентности теплоты и работы, что и отличает его от закона сохранения энергии в механике. Он имеет достаточно много формулировок, например:

- невозможны уничтожение и возникновение энергии;
- теплота и работа являются единственно возможными формами передачи энергии от одних закрытых ТС к другим;
- всякая ТС имеет однозначную функцию состояния, называемую внутренней энергией, изменяющуюся только под влиянием внешних воздействий в процессе перехода системы из одного состояния в другое. Внутренняя энергия – функция состояния ТС, определяемая тем, что ее приращение в любом процессе, происходящем в закрытой системе, равно сумме теплоты, сообщенной системе, и работе, совершенной над ней. Всякий термодинамический параметр является потенциальной функцией состояния ТС. Это означает, что его значение не зависит от пути перехода системы в данное состояние, т.е. не зависит от термодинамического процесса, предшествующего данному состоянию.

Полная энергия ТС объемом V , находящейся во внешней среде, состоит из собственно внутренней энергии системы U и энергии, которую необходимо затратить, чтобы обозначенный объем внести в среду давлением p . Полная энергия ТС получила название энтальпии. Энтальпия – функция состояния ТС, равная сумме внутренней энергии и произведения объема на давление

$$H = U + p \cdot V. \tag{3.1}$$

Уравнение баланса энергии технической системы. На рис. 3.2 дана самая общая схема взаимодействия технической системы с ОС. В ряде случаев из ОС выделяют

внешние объекты (ВО) – термодинамические системы, которые могут быть источниками и приемниками энергии. Тогда совокупность ВО и непосредственно ОС называют моделью окружения (МО).

В соответствии с представленной схемой взаимодействия системы с ОС можно записать уравнения материального и энергетического балансов.

Уравнение материального баланса имеет вид

$$\Sigma \dot{M} + \dot{M}_{o.c.} = \Sigma \dot{M}'' + \dot{M}''_{o.c.} + \Delta M, \quad (3.2)$$

где $\Sigma \dot{M}$, $\Sigma \dot{M}''$ – соответственно входные и выходные потоки вещества в единицах массы, которыми система обменивается с внешними объектами; $\dot{M}_{o.c.}$, $\dot{M}''_{o.c.}$ – соответственно входные и выходные потоки вещества в единицах массы, которыми система обменивается с окружающей средой; $\Delta M = M_{\text{сист.кон.}} - M_{\text{сист.нач.}}$ – масса, аккумулярованная (потраченная) системой в рассматриваемом процессе.

Уравнение баланса энергии имеет вид

$$\Sigma \dot{I} + \Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{L} + \dot{Q}_{o.c.} = \Sigma \dot{I}'' + \Sigma \dot{Q}'' + \Sigma \dot{L}'' + \dot{Q}''_{o.c.} + \Delta W, \quad (3.3)$$

где $\Delta W = W_{\text{сист.кон.}} - W_{\text{сист.нач.}}$ – приращение энергии ТС между начальной и конечной точками процесса; $\Sigma \dot{I}$, $\Sigma \dot{I}''$ – соответственно входные и выходные потоки энергии соответствующих материальных потоков, которыми система обменивается с внешними объектами; $\Sigma \dot{Q}$, $\Sigma \dot{Q}''$ – соответственно подвод от внешних объектов и отвод энергии к ним в виде теплоты тех или иных процессов; $\Sigma \dot{L}$, $\Sigma \dot{L}''$ – соответственно подвод от внешних объектов и отвод энергии к ним в виде работы тех или иных процессов; $\dot{Q}_{o.c.}$, $\dot{Q}''_{o.c.}$ – соответственно подвод из окружающей среды и отвод энергии к ней в виде теплоты различных процессов, протекающих в системе и на границе сопряжения с внешней средой. Прочие обозначения пояснены на рис. 3.2.

В уравнениях (3.3) и (3.2) не учитываются кинетическая и потенциальная энергия ТС как единого целого. Для стационарной ТС (стационарным называется состояние ТС, при котором в результате постоянных внешних воздействий, распределение значений параметров во всех ее частях остается неизменным во времени, если последнее не соблюдается, то имеет место нестационарное состояние ТС) $\Delta M=0$ и $\Delta W=0$. Подобные балансовые уравнения могут быть составлены не только для всей системы в целом, но и для каждой ее части (подсистемы).

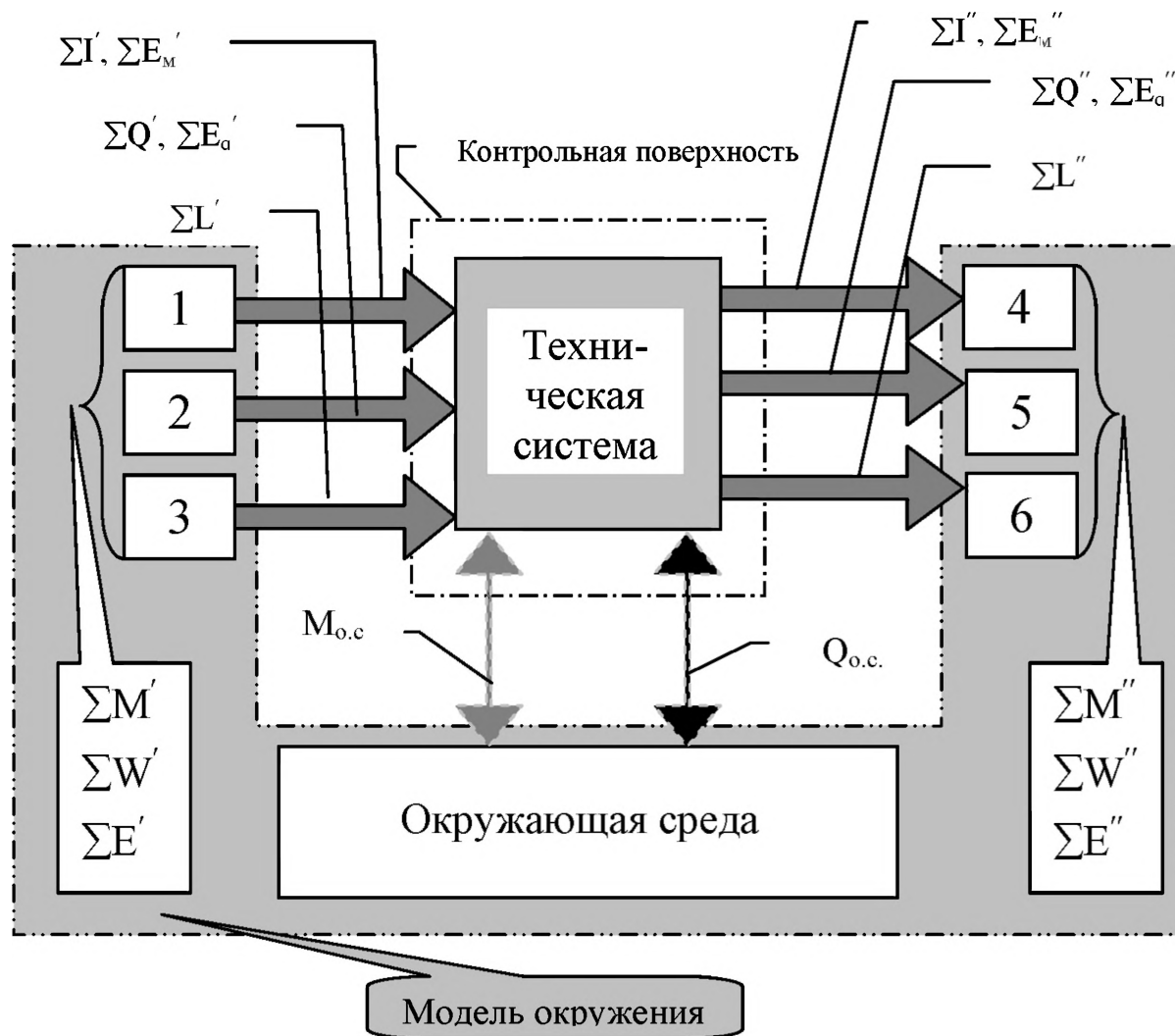


Рис. 3.2. Схема взаимодействия технической системы с моделью окружающей среды (окружающей средой и находящимися в ней объектами): 1,2,3 – внешние объекты, источники соответственно потоков вещества, энергии в форме теплоты и работы тех или иных процессов; 4,5,6 – внешние объекты, приемники соответственно потоков вещества, энергии в форме теплоты и работы термодинамических процессов.

Для иллюстрации особенностей энергобаланса конкретной ТС, повышения его наглядности используется его графическое изображение в виде полосовой диаграммы потоков энергии или диаграммы Сэнки (рис. 3.3 и рис. 3.5-б). На этой диаграмме потоки энергии изображаются полосами, ширина которых пропорциональна соответствующим величинам энергии, т.е. диаграмма в отношении ширины полос имеет постоянный масштаб. Направление потока энергии указывается стрелками, можно обозначать и переход одного вида энергии в другой с помощью условных обозначений (штриховка, затемнение и т.д.). Полосы на диаграмме могут проходить самым

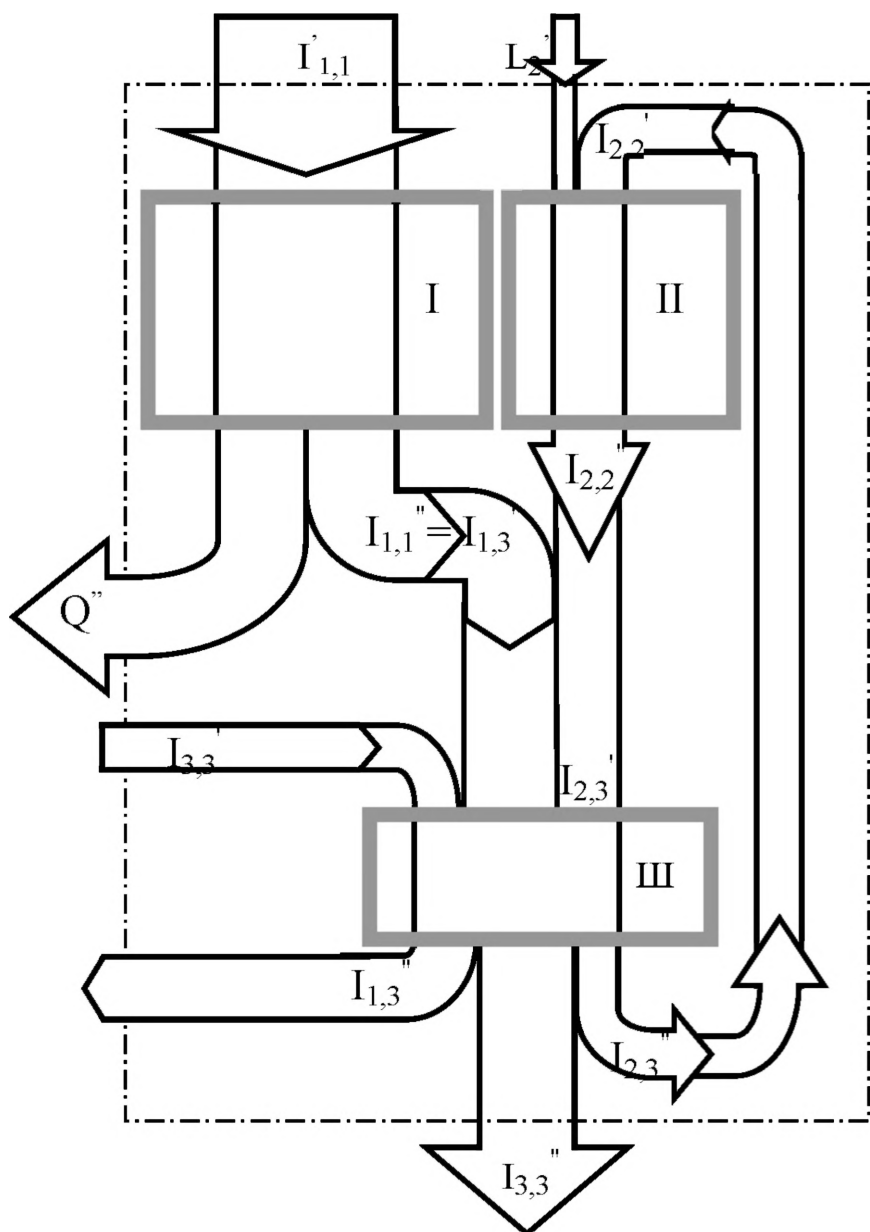


Рис.3.3. Диаграмма потоков энергии некоторой ТС. Обозначения: I – энтальпия веществ, входящих (уходящих) в систему; L , Q – соответственно работа и теплота процессов, протекающих в системе или на границе сопряжения ТС с моделью окружения, в результате которых осуществляется энергообмен между ними; верхние индексы (') – входные потоки, (") – выходные потоки; нижние индексы обозначают поток и элемент системы, с которым он связан.

различным способом, но всегда должно выполняться условие: их общая ширина должна оставаться постоянной, что отражает закон сохранения энергии.

Внешние потоки энергии непременно пересекают контрольную поверхность, внутренние потоки энергии проходят внутри контрольной поверхности.

Балансовые уравнения делятся на несколько типов: частные, полные, тепловые. Частные энергобалансы составляются для одного или части энергоресурсов, используемых системой. Они получили достаточно широкое распространение, но необходимо осознавать, что распределение общих статей расхода системы между различными поступающими энергоресурсами является задачей, не имеющей однозначного решения. (Это та же задача, что и распределение затрат между продукцией интегрированных технологических процессов, которая до сих пор не имеет однозначного решения). Частные энергобалансы имеют право на жизнь, но их использование должно быть крайне взвешенным, весьма ограниченным, а выводы подвергаться независимой проверке.

Полные энергобалансы объективно отвечают сути закона сохранения, и только они могут дать объективную картину энергопотребления промышленным предприятием, поскольку показывают равенство прихода в систему и выхода из нее всех видов энергии, обеспечивающих осуществление технологического процесса. Только на них, в совокупности с балансами эксергии (о последних речь пойдет ниже), можно опираться при анализе энергопотребления теплотехнологическим процессом.

Тепловые балансы следует отнести к наиболее часто встречающимся зависимостям при расчетах огнетехнических установок. Их следует понимать как форму баланса энергии, к которой приходит последний в результате перегруппировки членов уравнения. Теплоту нельзя вносить в систему с материальными потоками, поскольку они ее не содержат. Теплота – энергетический эффект процессов преобразования, протекающих в системе, а также одна из форм энергообмена процесса взаимодействия системы с моделью окружения. Теплота является характеристикой процесса и только процесса протекающего то ли в системе преобразования энергии, то ли в системе преобразования вещества. Но если в системах преобразования энергии не возникает неоднозначности в определении теплоты протекающих процессов (за исключением теплового эффекта химической реакции окисления топлива), то в системах преобразования вещества возможна неоднозначность вычисления теплового эффекта совокупности химических реакций, поскольку можно привести различное количество самих реакций для одного и того же технологического процесса. А это позволяет получать результаты нужные для каждого конкретного случая и, понятно, далеко не совпадающие друг с другом. Другими словами, можно добиться нескольких значений КПД, каждое из которых «верно». По этой причине необходимо уходить от использования в уравнениях энергобаланса тепловых эффектов реакций, в том числе и от использования «теплоты горения топлива», как низшей Q_H^P , так и высшей Q_B^P , применяя вместо них значение химической энергии I_{μ} компонентов реакции. По этой причине тепловые балансы должны постепенно вытесняться из инженерной практики.

Энергетические характеристики системы. С учетом выше изложенных обозначений, уравнений и схемы взаимодействия ТС с моделью окружения, включающей

ОС и внешние объекты (ВО), рассмотрим энергетические размерные и безразмерные характеристики. Различают приходную и расходную части балансовых уравнений.

Приходная часть обычно при записи располагается слева от знака равенства уравнения баланса. Слагаемые приходной части, их вклад в энергобаланс объекта отображается в структуре энергопотребления технической системы, которая является важной характеристикой энергопотребления объекта. Очевидно, что вся приходная часть относится к затратам энергии. Вместе с тем, по сложившейся практике, к затратам относят лишь часть приходных статей полного энергобаланса (к этому подталкивает, в том числе, практика использования частных энергобалансов), тем самым вносится элемент субъективизма и неоднозначности оценок одного и того же объекта.

Расходная сторона энергобаланса показывает распределение поступившей энергии между подсистемами промышленного объекта. При этом выделяют две диаметрально противоположные по своей сути части: «полезную» или «полезный эффект» и «потери». И в отношении полезного эффекта, и в отношении потерь далее может осуществляться разделение на составляющие статьи, устанавливаться их процентный вес, в результате чего получают, бесспорно, важные характеристики. Следует констатировать и здесь присутствие элемента субъективизма: что считать полезным эффектом, и что потерями? Как вычислять тот и другой? Если какой-либо продукт технической системы мы не способны или не желаем использовать, его энергию заносить в потери? Следует признать такой подход оценки полезного эффекта необъективным. Об этом следует помнить при сопоставлении результатов анализа той или иной системы, проведенных различными исполнителями.

Наиболее известной энергетической характеристикой процессов протекающих в системе является энергетический коэффициент полезного действия (КПД). Понятие КПД стали использовать зачастую лишь как словосочетание, являющееся модным признаком времени, не задумываясь, что оно применимо, в основном, лишь к тем системам, где имеет место понятие термодинамической работы процесса, т.е. для части систем преобразования энергии.

Энергетический КПД определяется отношением полезного эффекта ($\Delta W_{\text{пол}}$) процесса, протекающего в ТС, к затратам ($\Delta W_{\text{затр}}$) на его проведение

$$\text{КПД} = \eta_{\text{э}} = \Delta W_{\text{пол}} / \Delta W_{\text{затр.}} \quad (3.4)$$

Энергетический КПД не может быть универсальной характеристикой системы, что вытекает из вышеприведенных характеристик полезного эффекта и затрат. Он также не имеет единого диапазона изменения для различных технических систем. Например, для тепловых двигателей его значения могут колебаться в диапазоне $0 < \eta_{\text{э}} < 1$; для холодильных машин – в диапазоне $0 < \eta_{\text{э}} < \infty$; для тепловых насосов - $1 < \eta_{\text{э}} < \infty$. Таким образом, КПД не обладает универсальностью даже для закрытых систем преобразования энергии, к которым относятся выше перечисленные устройства.

Для несоизмеримо более сложных открытых систем, и в первую очередь для систем преобразования вещества, он вообще неприменим, поскольку целью технологического процесса является достижение требуемых свойств продукта. Последнее, как правило, не удастся связать с изменением энтальпии продукта. Можно привести немногочисленные исключения, в частности, некоторые сушила, нагревательные печи.

Для характеристики процессов протекающих в технических системах преобразования энергии, параллельно с КПД используется также величина, получившая название удельные затраты. Для ТС преобразования энергии удельные затраты являются величиной обратной КПД. Например, удельные затраты теплоты на получение одного джоуля работы в тепловых двигателях, определяются

$$q_{\text{т}} = 1/\text{КПД} = \Delta W_{\text{затр.}} / \Delta W_{\text{пол}} = Q/L, \quad (3.5)$$

где L , кДж/час – работа, полученная от двигателя в течение заданного отрезка времени, в данном случае в один час; Q кДж/час – теплота, подведенная к двигателю в течение того же отрезка времени.

Для ТС преобразования вещества удельные затраты энергии на выпуск единицы продукции являются, чаще всего, единственным относительным энергетическим показателем технологического процесса, устанавливаемым на основании баланса энергии. Этот показатель получил широкое распространение. Но надо понимать, что это достаточно неполная характеристика, не позволяющая сделать прямого заключения о качестве организации энергетического обеспечения технологического процесса. По большому счету, удельные энергозатраты не дают характеристики объекта. Сравнение удельных энергозатрат на выпуск аналогичной продукции на других

производствах не является объективной оценкой рассматриваемой системы по целому комплексу причин:

- невозможно существование абсолютно адекватного производства;
 - относительности сравнения;
 - использования для энергообеспечения объекта нескольких энергоресурсов одновременно, к которым неприменимо в абсолютном смысле понятие аддитивности.
- К тому же, на разных производствах набор энергоресурсов может использоваться в неповторяющихся соотношениях.

3.3. Эксергетический баланс и эксергетические характеристики

Сложившаяся ситуация с энергоресурсами предъявляет повышенные требования к методам исследования тех или иных объектов с целью выявления возможности и путей снижения потребления энергии. Прежде всего, это касается методов составления энергобалансов теплотехнологических систем, являющихся основными потребителями энергоресурсов. Как вытекает из предыдущего рассмотрения, не все благополучно с количественной оценкой на основании предложенных относительных характеристик. С другой стороны, для теплотехнологических процессов в дополнение к обычной количественной оценке совершенно необходима количественная оценка качества процесса энергоиспользования. Эту принципиально новую оценку наиболее просто можно провести на основе понятия эксергии.

Впервые упоминание об этой функции встречается в работах классика термодинамики американского физика Дж. Гиббса в 1873 году. Затем советские физики Л. Ландау и Е. Лившиц пояснили значение этой новой функции, но не дали ей никакого названия. В разных работах она именовалась “техническая работоспособность” или “работоспособность”. Термин “эксергия”, ставший общепринятым, ввел в 1956 году польский ученый Я. Шаргутт.

Эксергия термодинамической системы – максимальная работа, которую система производит при обратимом переходе в состояние полного равновесия с окружающей средой.

Здесь, видимо, следует отметить очень важное обстоятельство: при выборе первичного энергоресурса нас интересует величина его эксергии, а не самой энергии. Последняя может быть очень большой, например, энергия охлаждающей воды, сбрасываемой в озере Новолукомльской тепловой электростанцией, превышает потребность в энергии ряда предприятий. Но для последних подобная энергия бесполезна. Для использования энергии важно не только ее величина, существенно отличие (являющееся движущей силой процессов) в температуре, давлении или химическом потенциале от таковых в окружающей среде. Последнее условие и учтено в определении эксергии: эксергия тел зависит от параметров тела и от параметров окружающей среды. Для иллюстрации указанной зависимости можно прибегнуть к знакомому всем льду. Зимой эксергия льда, близка к нулю, а летом достаточно велика. В противовес льду обратная вода систем охлаждения имеет эксергию близкую к нулю летом и более заметную величину зимой.

Из первого закона термодинамики, лежащего в основе энергобаланса, следует равнозначность любых энергоносителей и энергоресурсов, но, как следует из последних примеров, подобного в природе нет. Качество энергоресурса учитывается с помощью второго закона термодинамики. Поскольку эффективное энергоиспользование возможно лишь при условии учета изменения качества энергии в ходе тех или иных превращений, необходимо рассмотрение второго закона термодинамики для углубления понимания сути проблем энергосбережения.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики, как и первый, является обобщением опытных данных, которые относятся, во-первых, к состояниям равновесия ТС и, во-вторых, к происходящим в этих системах процессам. Первый закон рассматривает превращения энергии в термодинамических процессах. Если исходить только из него, то в природе возможны любые процессы, которые не нарушают баланс энергии, в том числе, и переход теплоты от более холодного тела к более горячему. Второй закон термодинамики рассматривает направленность протекания естественных процессов.

Процессы в природе протекают под действием трех движущих сил: градиентов давления, температуры и химического потенциала. Опыт свидетельствует, что все естественные процессы идут в направлении установления равновесия, т.е. в направ-

лении исчезновения потенциально возможной работы: выравнивания температуры, давления, концентрации. Это имеет простую физическую иллюстрацию: газ вытекает из емкости с высоким давлением в среду, где давление ниже; энергия при теплообмене передается от более горячего тела к более холодному и т.д. На очевидном последнем факте основывается одна из формулировок второго закона термодинамики: теплота не может самопроизвольно переходить от менее нагретого тела к более нагретому.

Важнейшее различие теплоты и работы заключается в их неравнозначности в части взаимного превращения. Если при превращении работы в теплоту можно ограничиться изменением состояния одного лишь теплоприемника, то при преобразовании теплоты в работу, кроме охлаждения теплоотдающего тела, должно происходить изменение термодинамического состояния других ТС, участвующих в этом процессе. В случае, когда указанный процесс замкнут (циклический), часть теплоты теплоотдающей ТС должна быть отдана некому теплоприемнику, без чего невозможно провести преобразование. В случае, когда процесс незамкнут компенсация сводится к изменению термодинамического состояния другой ТС, обеспечивающей протекание процесса преобразования теплоты в работу. Такие изменения состояния ТС называется компенсацией. Без компенсации, как следует из опыта, невозможно превращение в работу ни одного джоуля теплоты.

Работу нельзя получать за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии - в этом основной смысл второго закона термодинамики. На этом важном факте основывается весьма популярная формулировка второго закона термодинамики: невозможен вечный двигатель второго рода, т.е. невозможно создать циклически действующую машину, единственным результатом которой было бы совершение механической работы за счет охлаждения теплового резервуара.

Понятие обратимости термодинамического процесса. Понятие обратимости занимает центральное место в курсе термодинамики, прежде всего потому, что оно является водоразделом между феноменологической термодинамикой и статистической физикой. Первая, как эмпирическая наука, содержание которой основывается на двух началах, оперирует только с обратимыми процессами и это одна из причин рассмотрения различий обратимых и необратимых процессов.

Обратимый процесс – термодинамический процесс, после которого система и взаимодействующие с ней системы (окружающая среда) могут возвратиться в начальное состояние без того, чтобы в системе и окружающей среде возникали какие-либо остаточные изменения.

Необратимый процесс – термодинамический процесс, после которого система и взаимодействующие с ней системы (окружающая среда) не могут возвратиться в начальное состояние без возникновения остаточных изменений в системе или окружающей среде.

Опыт показывает, что все процессы, происходящие в природе, необратимы. Вместе с тем, ряд процессов можно рассматривать как обратимые. Прежде всего, все обратимые процессы бесконечно медленные. Обратное, однако, не имеет места. Причины необратимости процессов могут быть разные, рассмотрим основные.

1. *Конечная скорость их протекания.*

2. *Конечная разность температур* при протекании процесса теплообмена. Обычный переход теплоты от одной ТС к другой даже при сколь угодно малой, но конечной, разнице температур является необратимым поскольку теплообмен происходит лишь в направлении от более нагретого тела к менее нагретому, но не наоборот.

3. *Наличие трения* при движении среды. Трение является характерной причиной необратимости, возникающей при любом перемещении. Трение внешнее (потока о стенки) канала, трение внутреннее (потока между различными его объемами) сопровождается превращением энергии и выделением ее в форме теплоты, которая затем рассеивается в ОС. В итоге работа процесса уменьшается на соответствующую величину работы против сил трения. При обратном протекании процесса эту недополученную энергию в форме работы процесса необходимо где то изъять.

4. *Смешение сред.* Всякое смешение сред является сугубо необратимым процессом. В самом деле, смешение, например, двух различных веществ не сопровождается выделением работы, в то же время, для разделения смеси на составляющие компоненты необходимы затраты энергии.

Значение обратимости заключается также и в том, что оно дает точку отсчета при оценке реальных процессов. Всякий обратимый виртуальный процесс является

эталонном для сходственного реального процесса: работа сжатия в обратимом процессе всегда будет минимальна, т.е. меньше работы сжатия подобного реального процесса; работа расширения в обратимом процессе в сравнении с реальными процессами будет максимальна. Степень необратимости реальных тех или иных процессов различна и для выяснения ее необходимо опираться на эталон, которым может быть обратимый процесс. Чем меньше степень необратимости, тем меньше реальный процесс отличается от обратимого, тем он термодинамически совершеннее. На этом утверждении может быть создана универсальная оценка энергетической эффективности ТС.

Из второго закона термодинамики вытекает существование еще одной термодинамической функции, получившей название энтропии. Энтропия – функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал (dS) при элементарном равновесном (обратимом) процессе, происходящем в этой системе, равен отношению бесконечно малого количества теплоты (dQ), сообщенной системе, к термодинамической температуре (T) системы

$$dS = dQ/T. \quad (3.6)$$

Энтропия не может быть измерена физическими приборами, толкование ее физического смысла находится вне рамок феноменологической термодинамики, что делает ее неудобной для понимания, но не умаляет ее значимости.

Для необратимых процессов, имеет место важное соотношение, связывающее на каждом элементарном участке необратимого термодинамического процесса изменение энтропии с отношением теплоты процесса к абсолютной температуре

$$ds > dq/T. \quad (3.7)$$

Объединив выражения (3.7) и (3.6), получаем в дифференциальной форме аналитическую запись второго закона, справедливую для любых ТС

$$ds \geq dq/T, \quad \Delta s = s_2 - s_1 \geq \int_1^2 \frac{dq}{T}, \quad (3.8)$$

где знак равенства относится к обратимым процессам, знак “больше” – к необратимым.

Таким образом, изменение энтропии при протекании необратимых процессов всегда больше, чем в подобных обратимых процессах. Для изолированной или адиабатно изолированной системы имеет место условие $dq = 0$, что позволяет получить из (3.8)

$$ds \geq 0, \quad \Delta s = s_2 - s_1 \geq 0. \quad (3.9)$$

Полученное соотношение позволяет сформулировать важнейший вывод: энтропия изолированной ТС не может уменьшаться. Она остается постоянной при протекании в системе обратимых процессов и может только возрастать, если протекающие в ней процессы необратимы. Из последнего вывода следует, что в упомянутых системах при достижении энтропией максимального значения $S_{\text{макс}}$ наступает состояние равновесия. Действительно, поскольку энтропия изолированной и адиабатно изолированной ТС может только возрастать, как только энтропия достигает максимума, в этих системах невозможны какие-либо процессы, т.е. наступает равновесное состояние.

Как ранее отмечалось, согласно второму закону, энергия, передаваемая в форме теплоты, не может быть полностью преобразована в любые другие виды энергии, в том числе, в энергию, передаваемую в форме работы. Работа же наоборот, может быть преобразована полностью в другие виды энергии. По признаку возможности полноты преобразования все виды энергии делят на две качественно различающиеся группы:

- 1) первая группа объединяет энергию, что без ограничений превратима в любые другие виды;
- 2) вторая группа объединяет энергию, которая не может полностью преобразовываться в другие виды.

Из изложенного вытекает понимание (необходимое для дальнейшего изучения проблем энергоиспользования) нарушения абсолютной аддитивности различных видов энергии, которую устанавливает первый закон термодинамики. Невозможность простого суммирования качественно различных видов энергии первой и второй групп объясняет введение характеристики энергии, позволяющей количественно оценить ее с учетом качественных особенностей. Такой характеристикой энергии является эксергия, которая имеет безусловную аддитивность во всех случаях.

Эксергия – максимальное количество энергии первой группы, которую система может произвести при обратимом переходе в состояние полного равновесия с окружающей средой. Это более универсальное определение облегчает понимание применения эксергии и эксергетического анализа к любым системам, прежде всего, теплотехнологическим, где встречается энергия второй группы.

Эксергия ТС имеет *физическую и химическую составляющие*. Физическую эксергию тела составляют его потенциальная и кинетическая энергии с частью внутренней энергии или, для потоков вещества, с частью энтальпии.

В ходе анализа систем преобразования энергии при расчете эксергии потока рабочего тела, *при расчете физической составляющей эксергии* индивидуального вещества можно воспользоваться соотношением

$$e = (i - i_0) - T_0(s - s_0), \text{ кДж/кг}, \quad (3.10)$$

где i, s - соответственно энтальпия и энтропия системы в данном состоянии; i_0, s_0 – соответственно энтальпия и энтропия системы в состоянии равновесия с окружающей средой, т.е. при $T = T_0, p = p_0$; T_0, p_0 – соответственно температура и давление окружающей среды.

Для определения *эксергии потока теплоты q* , характеризующегося постоянным температурным уровнем T , используется соотношение

$$e_q = q \cdot \tau_e, \quad (3.11)$$

где $\tau_e = (1 - T_0/T)$ – эксергетическая температурная функция.

Химическая эксергия веществ определяется несколько сложнее и ее значения приводятся в термодинамических справочниках, а для химических элементов приведены в таблице Менделеева.

Энтропия изолированной системы, на чем ранее заострялось внимание, при протекании в ней реальных, необратимых процессов, может только увеличиваться - гласит второй закон термодинамики. На основании этого факта и соотношения (3.10) следует: эксергия реальной изолированной системы может лишь убывать, исчезать, т.е. действительно теряться. (В отличие от энергии, которая для изолированной системы остается неизменной.) В этом глубокий смысл понятия эксергии. Эксергия означает, согласно определению, способность производить работу, именно эта способность и представляет интерес для практики, потерю системой этой спо-

способности следует избегать. Следовательно, понятия "энергосбережение", "экономия энергии", открывшие данную главу, означают ни что иное, как сбережение эксергии. Покупая любой энергоресурс, мы покупаем, прежде всего, его эксергию, и только эксергию, и сберегать можно и нужно только эксергию. При серьезном изучении проблем энергосбережения невозможно обойтись без понятия эксергии.

По мере снижения температуры системы увеличивается разница между ее энергией и эксергией. Из этого следует, что сохранение энергии при понижении температуры системы (например, смешение двух потоков вещества разной температуры) сопровождается потерями эксергии. Процессы отопления, вентиляции, кондиционирования, технологические процессы, протекающие при температурах и давлениях близких к температуре и давлению окружающей среды, необходимо описывать в эксергетических величинах. Например, Геологический комитет США учитывает геотермальные ресурсы, температура которых, как известно, невелика, по их эксергии, а не по энтальпии.

Сегодня около половины первичных энергоресурсов в РБ расходуется для обеспечения технологических процессов и иных нужд, для которых требуется температура до $1,5 \cdot 10^2$ °С, что означает колоссальные потери эксергии и, в конечном итоге, перерасход топлива. Использование джоуля энергии высокого потенциала (большого значения эксергии) сегодня позволяет с помощью теплового насоса получить 2 – 3 джоуля низкопотенциальной энергии, требуемой в выше обозначенных случаях, потребляющих 50 % первичного топлива. Нетрудно подсчитать перерасход топлива при существующих методах отопления, вентиляции, энергообеспечения технологий, где не требуется высокая температура.

Эксергетический анализ позволяет проводить термодинамическую оптимизацию системы, которая может заключаться:

- в выборе наиболее выгодных параметров технологических потоков;
- в выборе режимов работы оборудования;
- в замене оборудования;
- в реструктуризации системы.

Вместе с тем, надо помнить, что эксергетический анализ дает информацию относительно возможного улучшения термодинамических процессов, но решение о

проведении мероприятий по указанному улучшению принимается только на основании технико-экономического анализа.

Эксергетический анализ позволяет решать и менее глобальные, но важные инженерные задачи:

- оценка термодинамической эффективности различных процессов;
- проведение переоценки потоков рассеиваемой энергии, определенных из баланса энергии системы, с точки зрения возможности и эффективности их снижения;
- выявление и количественное определение потерь принципиально не обнаруживаемых из баланса энергии, а также установление путей их уменьшения. Отметим, что относительный вес этих потерь (связанных с необратимостью процессов горения, смешения потоков одного вещества с целью корректировки температуры и смешения потоков различных веществ с целью корректировки состава, дросселирования, теплообмена, трения), велик и, как правило, превышает 50%;
- сопоставление и количественная оценка энергоресурсов различных видов;
- распределение затрат в комплексном, интегрированном производстве между различной его продукцией;
- оценка технического уровня систем и составляющих подсистем;
- установление принципиальной возможности реализации предлагаемого процесса или устройства.

Уравнение баланса эксергии технической системы. Обратимся к рис. 3.2, где представлена схема взаимодействия ТС с моделью окружения, и к рис. 3.4, на котором показана схема потоков эксергии некоторой системы.

В общем случае, для ТС можно записать уравнение эксергетического баланса в виде

$$\sum E_M' + \sum E_q' + \sum L' = \sum E_M'' + \sum E_q'' + \sum L'' + \sum D + \Delta E, \quad (3.12)$$

где $\sum D$ - потери эксергии ТС; $\Delta E = E_{c,2} - E_{c,1}$ - приращение эксергии ТС между начальной и конечной точками процесса; $\sum E_M'$, $\sum E_M''$ - соответственно сумма входных и сумма выходных эксергий вещества в потоке; $\sum E_q'$, $\sum E_q''$ - соответственно

сумма входных и сумма выходных эксергий тепловых потоков; $\Sigma L'$, $\Sigma L''$ – соответственно сумма входных и сумма выходных потоков энергии в форме работы тех или иных процессов.

В уравнениях (3.11) не учитываются кинетическая и потенциальная энергия ТС как единого целого. Для стационарной ТС $\Delta E=0$.

Уравнение баланса эксергии ТС (3.11) для стационарной ТС может быть записано также

$$\Sigma E' = \Sigma E'' + \Sigma D, \quad (3.13)$$

где $\Sigma E'$ – сумма всех входных потоков эксергии ТС, так называемый, эксергетический вход системы; $\Sigma E''$ – сумма всех выходных потоков эксергии ТС, так называемый, эксергетический выход системы.

В случае обратимости всех процессов протекающих в самой системе, обратимости всех процессов взаимодействия системы с моделью окружения при их взаимодействии, потери эксергии отсутствуют и выполняется равенство $\Sigma D = 0$. В реальных условиях, когда протекающие в системах процессы необратимы, всегда должно выполняться условие $\Sigma D > 0$. Если последнее важнейшее условие не выполняется для всей ТС или какой-либо ее полсистемы, то это указывает либо на наличие ошибки в расчетах, либо на принципиальную невозможность реализации самой системы.

Все потери эксергии ΣD могут быть разделены на две группы:

- 1) потери внутренние - ΣD_i , связанные с внутренними процессами, вызванные необратимостью вследствие трения, смешения, тепло- и массообмена;
- 2) потери внешние - ΣD_e , вызванные необратимостью процессов сопряжения системы и модели окружения, а также наличием далее не используемых, уходящих из ТС в ОС потоков вещества или энергии, имеющих не нулевую эксергию.

Потери эксергии, как и ее потоки, абсолютно аддитивны, что позволяет записать соотношение

$$\Sigma D = \Sigma D_i + \Sigma D_e. \quad (3.14)$$

Для иллюстрации особенностей баланса эксергии конкретной ТС, повышения информативности и наглядности, используется его графическое представление в ви-

де полосовой диаграммы потоков эксергии или диаграммы Грассмана (рис. 3.5-в). Отличие этой диаграммы от диаграммы Сэнки в том, что в диаграмме Грассмана ширина полос должна уменьшаться или полосы должны вовсе исчезать, что отражает закон потерь эксергии в реальной ТС. Потери эксергии на диаграмме Грассмана изображаются в виде треугольника потерь, катет которого в масштабе определяет соответствующие потери в том или ином элементе. Полоса, соответствующая внешним потерям эксергии, непременно пересекает контрольную поверхность ТС. Полоса, отображающая внутренние потери эксергии, всегда обрывается внутри контрольной поверхности.

С учетом выше изложенного рассмотрим эксергетические размерные и безразмерные характеристики ТС. К первым относят:

- $\Sigma E'$ - эксергетический вход ТС;
- $\Sigma E''$ - эксергетический выход ТС – сумма всех потоков эксергии, которые далее где-либо используются в любой форме;
- ΣD -потери, определяемые для стационарных ТС разностью эксергетических входа и выхода;
- $P'_e = \Sigma E' / \tau$ - эксергетическая входная мощность ТС;
- $P''_e = \Sigma E'' / \tau$ - эксергетическая выходная мощность ТС. Здесь τ - время, к которому относится рассматриваемый баланс.

Следует обратить внимание на то, что на базе эксергии с помощью абсолютных характеристик появляется возможность сопоставления производительности многоцелевых интегрированных установок без всяких дополнительных пересчетов по одной единственной абсолютной характеристике. Замечательно и другое: для оценки ТС на базе эксергетического анализа не требуется придумывать никаких ТС сравнения, что чаще всего невозможно сделать для сложных систем преобразования вещества. Безразмерные эксергетические характеристики являются объективными показателями эффективности теплотехнологических процессов, учитывающими особенности их протекания в конкретной ТС. Это могут быть эксергетические коэффициенты полезного действия ($KПД_e$), показывающие отношение выходных потоков ТС к входным, либо удельные затраты эксергии как отношение входных потоков к выходным, либо удельные затраты эксергии на единицу произведенной продукции.

Основная задача эксергетического анализа (ЭА) заключается в выявлении необратимых процессов и количественной оценке их влияния на потери эксергии, иначе на возрастание энтропии, связанное с термодинамическим совершенством системы. Чем выше организация системы с термодинамических позиций, тем меньшие потери эксергии в ней имеют место, тем выше ее эксергетический КПД_е в тех или иных процессах.

Эксергетический КПД. При изучении ЭА удобно использовать следующую схему потоков эксергии ТС, приведенную на рис. 3.4. Потоки эксергии, обозначенные на схеме, связаны следующими соотношениями:

$$E' = E'_{\text{пер.}} + E'_{\text{пр.}} = E_{\text{расп.}} + E^{\text{tr}}. \quad (3.15)$$

$$E_{\text{расп.}} = E_{\text{исп.}} + \sum D_e + \sum D_i. \quad (3.16)$$

$$E'' = E_{\text{исп.}} + E^{\text{tr}} = E''_{\text{в.р.}} + E''_{\text{пол.}} \quad (3.17)$$

Наиболее известное выражение для расчета КПД_е, представляющее, так называемую общую методику определения эксергетического КПД_е, имеет вид

$$\eta_e = \sum E'' / \sum E' = 1 - \sum D / \sum E'. \quad (3.18)$$

Обращает на себя внимание простота использования предлагаемой зависимости, поскольку понимание ее составляющих лишено субъективизма, который присутствует в понимании составляющих энергетического КПД.

Величина КПД_е позволяет оценить степень термодинамического совершенства использования первичной энергии данной ТС. Значение η_e , рассчитанное по данному выражению, однозначно определяется и всегда лежит в интервале $0 \div 1$. $\eta_e = 1$ - соответствует термодинамически идеальной ТС, в которой отсутствуют эксергетические потери. $\eta_e = 0$ соответствует ТС, где вся подводимая эксергия полностью теряется и система термодинамически предельно несовершенна. В реальных системах величина η_e занимает промежуточное значение, и чем она ближе к 1, тем более эффективное энергоиспользование имеет место.

Для иллюстрации различий ролей КПД и КПД_е прибегнем к простейшему анализу работы наиболее знакомого всем теплового двигателя. На рис. 3.5 приведены его принципиальная схема и ей соответствующие диаграммы Сэнки и Грассмана, соответственно отображающие балансы энергии и эксергии.

Величина КПД для него определяется выражением (3.4)

$$\eta_{\text{э}} = \Delta W_{\text{пол.}} / \Delta W_{\text{затр.}} = L_{\text{ц}} / Q_1, \quad (3.19)$$

где $L_{\text{ц}}$ – работа двигателя за цикл, Q_1 – теплота, подводимая к рабочему телу за цикл.

Соответственно выражение (3.18) для теплового двигателя дает КПД_е

$$\eta_{\text{е}} = \Sigma E'' / \Sigma E' = L_{\text{ц}}'' / E_{\text{q}}' \quad (3.20)$$

Выражение (3.20) преобразуется с помощью (3.11) к виду

$$\eta_{\text{е}} = L_{\text{ц}}'' / E_{\text{q}}' = L_{\text{ц}}'' / (\tau_{\text{е}} \cdot Q_1')$$

и затем на основании (3.19) можно записать $\eta_{\text{е}} = \eta_{\text{э}} / \tau_{\text{е}}$, или

$$\eta_{\text{э}} = \eta_{\text{е}} \cdot \tau_{\text{е}}, \quad (3.21)$$

где $L_{\text{ц}}''$ – работа, отводимая от двигателя за цикл; E_{q}' – эксергия потока теплоты Q_1' , подводимая к двигателю за цикл; $\tau_{\text{е}} = 1 - T_0 / T_1$ – эксергетическая температурная функция потока теплоты Q_1 .

Из полученного (3.21) следует: значение энергетического КПД зависит от соотношения двух независимых друг от друга аргументов. Во-первых, термодинамического совершенства теплового двигателя, количественно определяемого величиной КПД_е, во-вторых, соотношением температур теплоотдатчика и теплоприемника, количественно определяемого величиной $\tau_{\text{е}}$. Нельзя не согласиться, что без учета данного факта весьма трудно на основании лишь одного КПД установить причину невысокой эффективности преобразования энергии в тепловом двигателе и определить действенные пути ее повышения.

В вопросе определения КПД_е для существенно более сложных открытых ТС преобразования вещества ситуация осложняется возможностью использования различных методик и, одновременно, оценкой роли побочных эффектов. Недостаток методики, лежащей в основе нахождения КПД_е по выражению (3.17), усложняющий ситуацию для открытых ТС преобразования вещества, известен. Она не учитывает целевое предназначение системы, что порой приводит к абсурдным результатам. Достоинство заключается в простоте использования, что важно для быстроты получения начальных оценок.

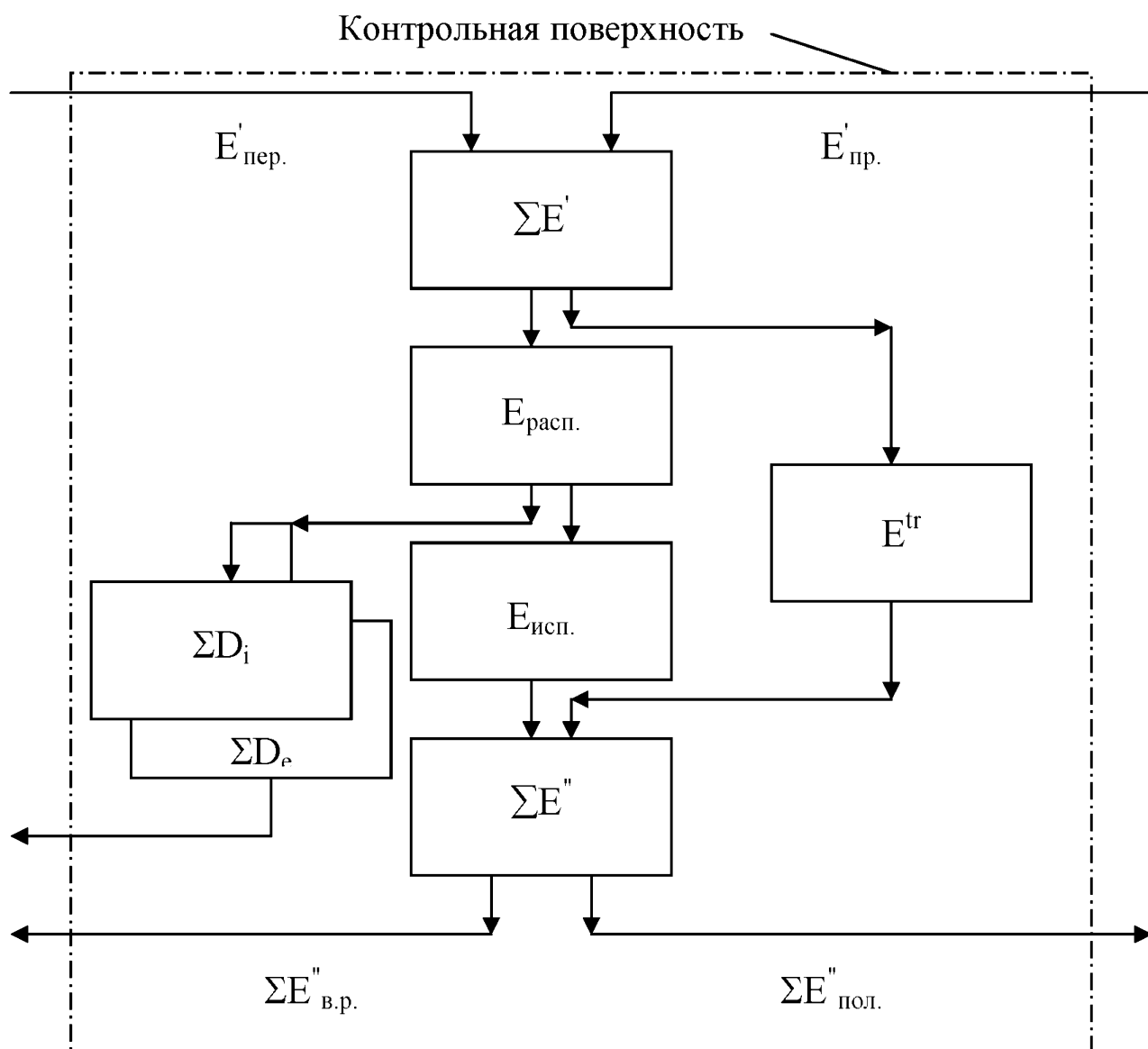


Рис. 3.4. Схема эксергетических потоков в ТС. Здесь $E'_{пер.}$ - эксергия затраченных первичных энергоресурсов; $E'_{пр.}$ - эксергия прочих потоков, поступающих в ТС; $E_{расп.}$ - располагаемая эксергия, т.е. эксергия, участвующая в реализации процессов, протекающих в системе; $E_{исп.}$ - полезная эксергия, т.е. используемая для достижения цели ТС; E^{tr} - транзитная эксергия, т.е. не претерпевающая ни количественных, ни качественных изменений в ТС; $E''_{пол.}$ - эксергия целевых выходных потоков ТС; $E''_{в.р.}$ - эксергия вторичных потоков в данной системе не используемая, но обязательно используется внешними объектами; D_i, D_e - соответственно внутренние и внешние потери эксергии ТС; $\Sigma E', \Sigma E''$ - соответственно эксергетические вход и выход системы

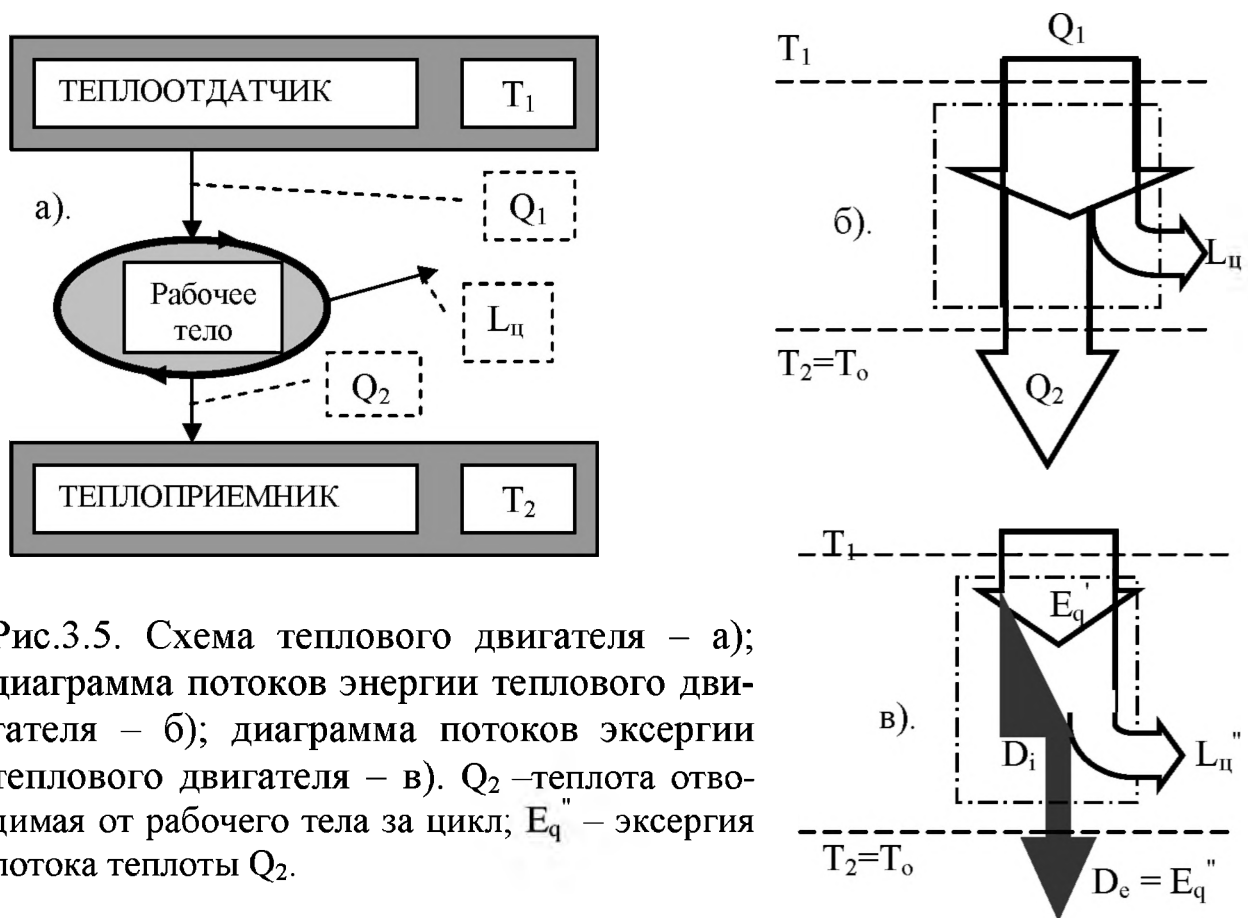


Рис.3.5. Схема теплового двигателя – а); диаграмма потоков энергии теплового двигателя – б); диаграмма потоков эксергии теплового двигателя – в). Q_2 –теплота отводимая от рабочего тела за цикл; E_q'' – эксергия потока теплоты Q_2 .

Предлагаются различные варианты усовершенствования общей методики нахождения KPD_e . По мнению большинства, наиболее универсальной является методика, использующая понятие транзитной эксергии. Модернизация методики связана с введением понятия транзитной эксергии - E^{tr} . По физическому смыслу транзитная эксергия представляет собой потоки эксергии, не участвующие в процессах имеющих место в ТС и не теряемых в ее пределах, рис.3.4. Для нахождения KPD_e предлагается соотношение

$$\eta_e = (\sum E'' - E^{tr}) / (\sum E' - E^{tr}) = 1 - \sum D / (\sum E' - E^{tr}) = E_{исп.} / E_{расп.} \quad (3.22)$$

Важна однозначная, формализованная трактовка транзитной эксергии, что не всегда просто сделать и без чего невозможно получать однозначные результаты. Очевидный недостаток методики, объясняющий попытки введения альтернативных зависимостей, кроется в существенном усложнении расчетов.

Другим важным показателем эксергетического баланса являются потери эксергии. Их делят на внешние (D_e) и внутренние (D_i). Внешние потери связаны с потоками вещества или энергии сбрасываемыми в окружающую среду и имеющими ненулевую эксергию. Они напрямую связаны с рассеиваемой энергией и определяются из первого закона термодинамики. Внешние потери эксергии, в этой связи, пред-

ставляют интерес в плане оценки перспективности вложений средств в борьбу с тем

или иным рассеянием энергии. Существует обратная зависимость между необходимыми капитальными затратами на мероприятия по снижению потока рассеяния энергии и величиной соответствующего потока эксергии.

Роль внутренних потерь эксергии, которые нельзя определить иначе как на основе второго закона термодинамики (наиболее просто это сделать с помощью эксергетического баланса), иная и связана с термодинамическим несовершенством непосредственно процессов в самой системе. Они указывают

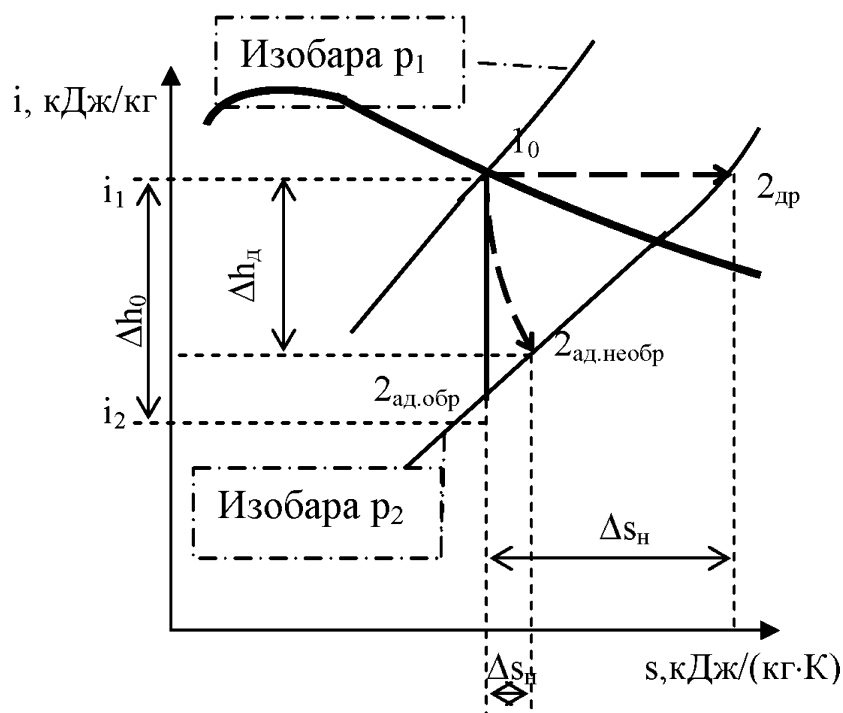


Рис.3.6. Понижение давления пара в адиабатном процессе расширения 1-2_{ад} и в процессе адиабатного дросселирования 1-2_{др}

на процессы, приводящие к понижению качества энергии. Устранение снижения ценности энергии (уменьшение внутренних потерь эксергии), в конечном итоге, приведет к снижению расхода первичной энергии. Выявить эти процессы на основе баланса энергии принципиально невозможно. Эффективность борьбы с внутренними потерями эксергии, оцениваемая по изменению энергопотребления, оказывается весьма значимой. Примером может служить, столь популярное в последнее время, энергосберегающее мероприятие, применимое для ряда котельных, предусматривающих замену процесса дросселирования пара процессом адиабатного расширения. В обоих случаях достигается основной эффект – снижение давления пара (рис.3.6). Но, если в процессе дросселирования, при сохранении энергии потока ($i_1 = i_2$), от него не отводится работа и имеет место потеря эксергии ($d_1 = e_1 - e_2 > 0$), в процессе

адиабатного расширения энергия потока уменьшается ($i_1 > i_2$), поскольку расходуется на совершение технической работы, а эксергия, при этом, сохраняется в большей степени. О последнем можно судить по увеличению энтропии Δs_n обоих процессов: чем оно меньше, тем меньше теряется эксергия. В итоге, с учетом побочного эффекта Δh (полученной дополнительно работы), достигается суммарная экономия первичной энергии.

Введение эксергетического анализа в практику научных и инженерных исследований совершенно необходимо. С этим не может не согласиться вдумчивый читатель. Без этого нельзя создать эффективную научно-методическую базу для установления резервов экономии теплотехнологических производств. Еще многое не решено в части применения ЭА для ряда конкретных теплотехнологических процессов, имеющих свои специфические особенности. Еще многое надо сделать, чтобы ЭА стал обязательной неотъемлемой частью каждого энергетического обследования любого объекта, как действующего, так и проектируемого.

3.4. Эксергетические характеристики и структура технической системы

Рассмотренные выше энергетические и эксергетические характеристики технической системы могут быть улучшены только тогда, когда будет понята ее внутренняя организация. Для установления связей внутри технической системы, прежде всего, необходимо провести разделение ее на блоки (подсистемы), что получило название декомпозиции. В результате декомпозиции получается структурная схема системы.

Структурная схема. В основе процедуры создания структурной схемы лежат технологический процесс, реализуемый в системе, и цели, которые должны быть достигнуты в результате последующего анализа. Оборудование и устройства технической системы, процессы, протекающие в них не представляющие интереса для исследования и физически связываемые в единую группу, объединяются в одном блоке, рассматриваемом в дальнейшем как «черный ящик». Наоборот, те подсистемы, которые вызвали интерес, разбиваются на более мелкие блоки. Производить первоначальное укрупнение блоков целесообразно и при исследовании сложных объектов

с тем, чтобы облегчить анализ. Работа, в этом случае, сводится к выявлению наиболее значимого в плане энергопотребления укрупненного блока и его дальнейшего самостоятельного рассмотрения. На структурной схеме, в отличие от технологической схемы, могут быть блоки, которые на последней схеме обозначены линиями. К таковым могут относиться, например, трубопроводы. На структурной схеме, в отличие от технологической, проставляются абсолютно все связи между подсистемами и моделью окружения: основные технологические потоки и вспомогательные, внутренние и внешние. Внешние связи отображают потоки вещества или энергии между системой и моделью окружения и на схеме пересекают ее контрольную поверхность. Внутренние связи – связи между ее подсистемами, на структурной схеме они не пересекают контрольную поверхность технической системы. Структурные связи системы могут быть однопараметрические и многопараметрические. Для полного энергетического описания первых требуется один параметр, примером может быть поток механической работы, поток электроэнергии. Описание вторых требует нескольких параметров: поток индивидуального вещества – трех параметров (например, расход, давление, температура) поток смеси веществ – к трем названным выше необходимо задание состава и т.д. Для иллюстрации процесса декомпозиции и создания структурной схемы объекта обратимся к следующему примеру.

На рис. 3.7 приведена принципиальная схема производства асфальтобетонной смеси (АБС). Она достаточно громоздка и не слишком проста для восприятия. На рис. 3.8 приведена укрупненная структурная схема технологического процесса того же производства, которая облегчает начальный анализ системы, помогает понять его суть и выделить основное для последующего рассмотрения. Дальнейший выбор требуемого блока осуществляется по тем или иным его показателям (наибольшее энергопотребление, или наибольшие абсолютные потери, или наилучшие [наихудшие] относительные характеристики). Затем снова производится декомпозиция и анализ этого выбранного более мелкого блока (рис. 3.9). Подобный процесс детализации рассмотрения и анализа объекта продолжается (рис. 3.10) и прерывается по достижении требуемой детализации анализа.

Внутренняя организация реальных объектов сложна и не поддается аналитическому исследованию, допуская лишь численное исследование. Вместе с

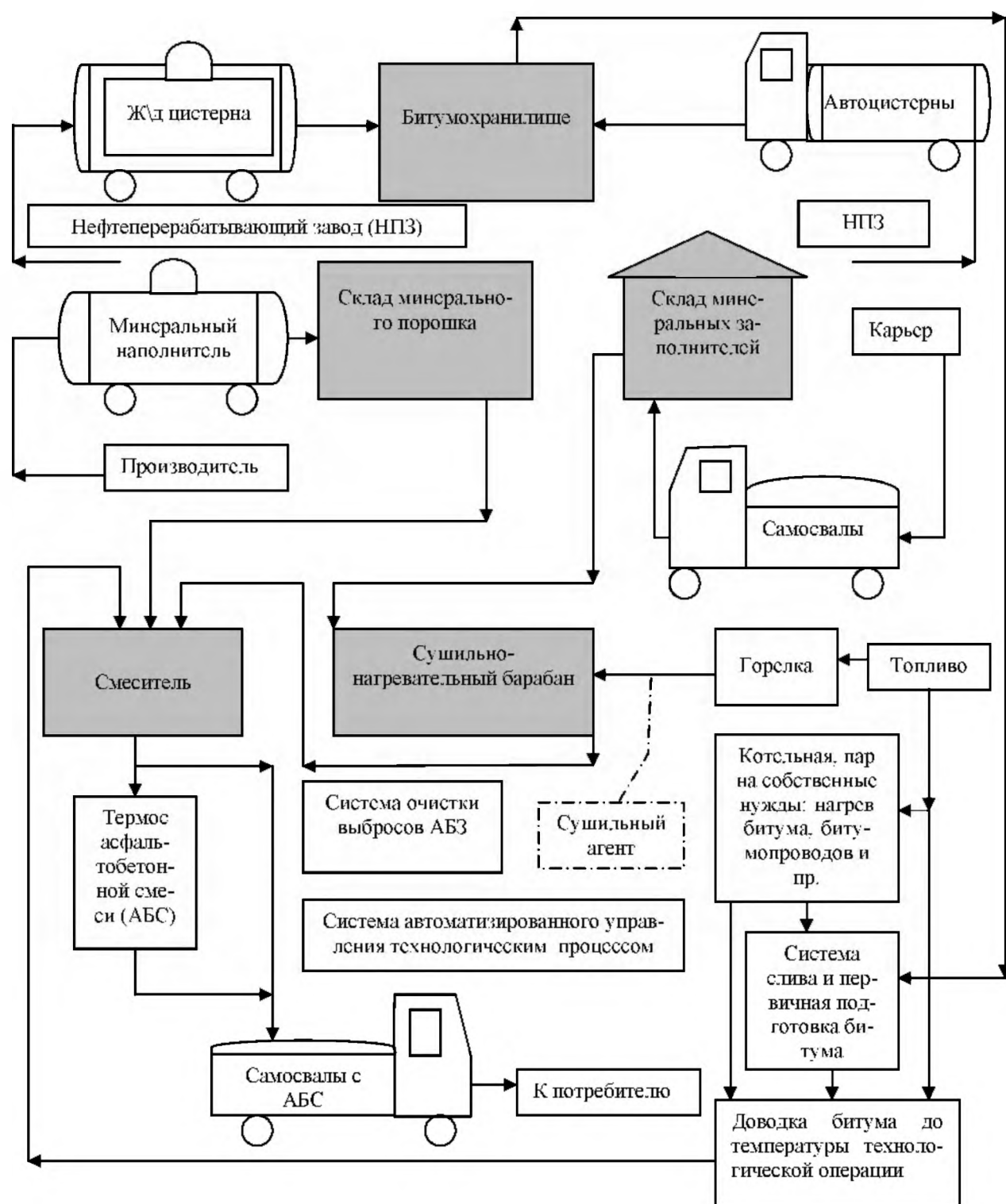


Рис. 3.7. Принципиальная технологическая схема асфальтобетонного завода (АБЗ)

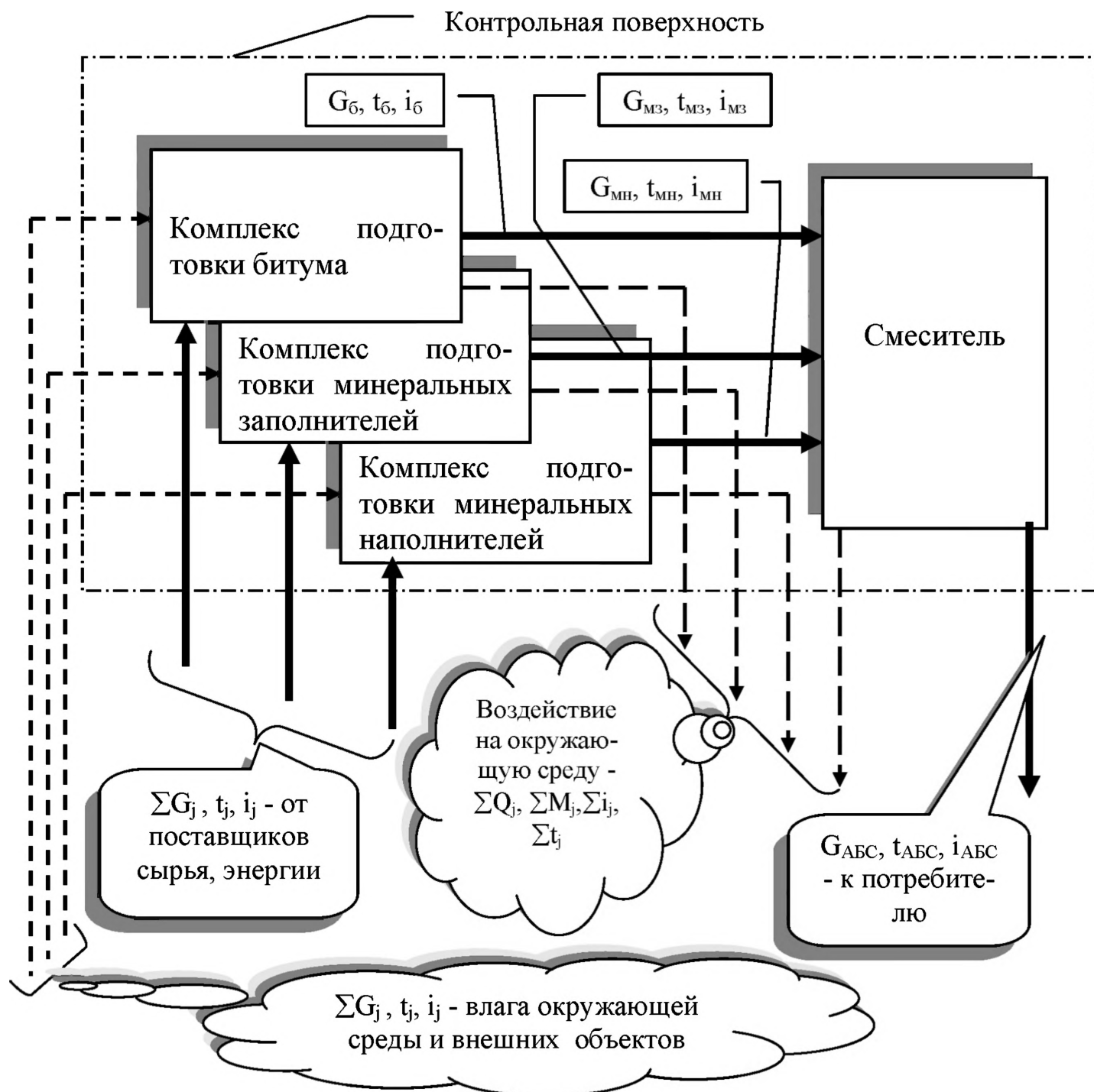


Рис.3.8. Укрупненная структурная схема производства АБС: G_b, t_b, i_b – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока битума; $G_{мз}, t_{мз}, i_{мз}$ – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока минеральных заполнителей; $G_{мн}, t_{мн}, i_{мн}$ – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока минеральных наполнителей; G_j, t_j, i_j – соответственно расход, температура, удельная энтальпия j -го материального потока; $G_{АБС}, t_{АБС}, i_{АБС}$ – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока асфальтобетонной смеси; $\Sigma M_j, t_j, i_j$ – соответственно все расходы, температуры, удельные энтальпии материальных потоков поступающих или покидающих ту или иную подсистему; ΣQ_j – все тепловые потоки, покидающие или поступающие в данную подсистему.

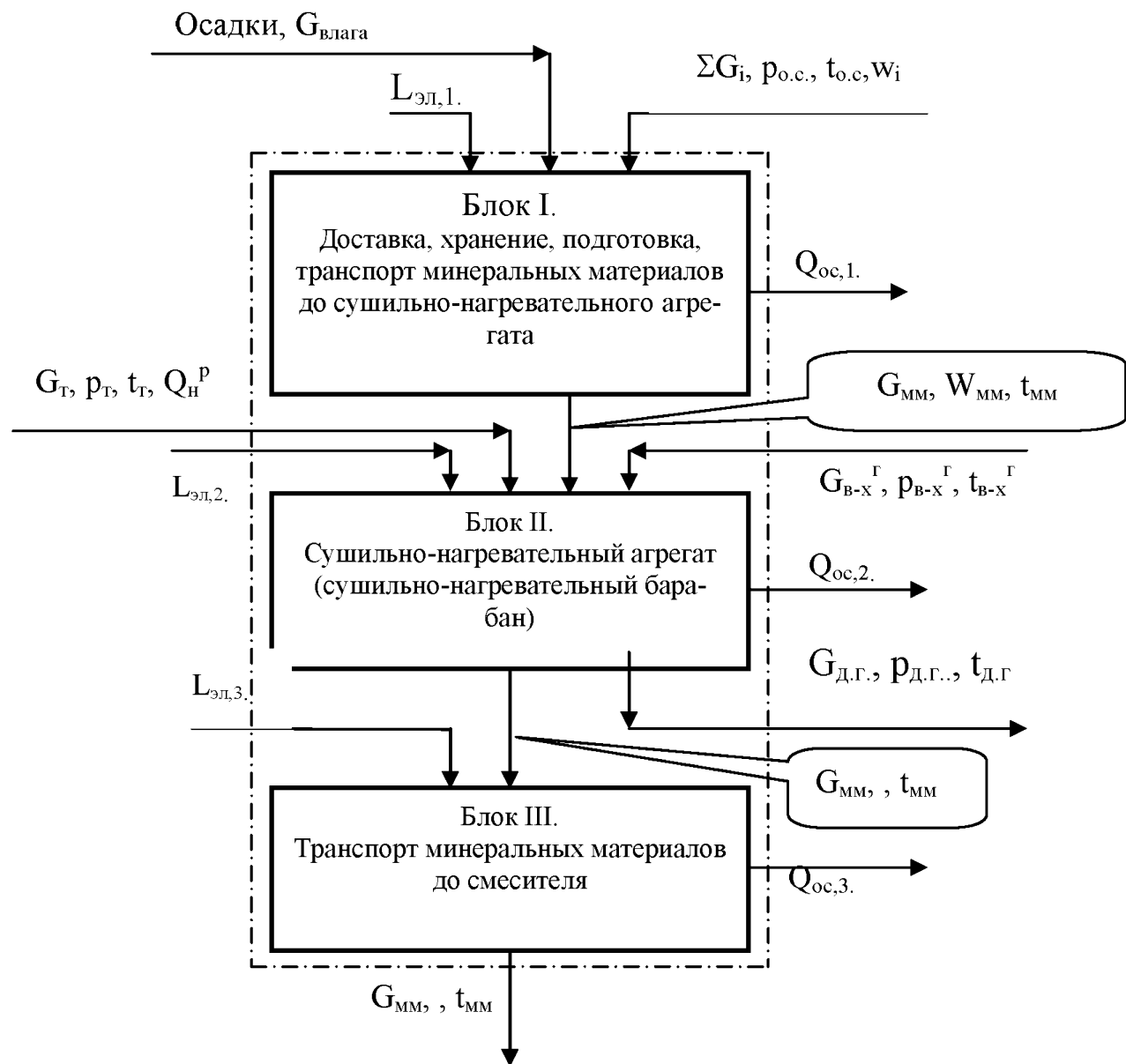


Рис.3.9. Структурная схема линии подготовки минеральных материалов: $G_{\text{влаги}}$ – расход потока влаги осадков; $L_{\text{эл},1}$ – энергия, поступающая в 1-й блок в форме работы; $\Sigma G_j, p_{o.c.}, t_{o.c.}, w_i$ – соответственно расход, давление, температура, влажность всех j -х потоков, поступающих в 1-й блок; $Q_{\text{ос},1}$ – рассеяние энергии в окружающую среду через ограждающие конструкции 1-го блока; $G_{\text{MM}}, W_{\text{MM}}, t_{\text{MM}}$ – соответственно расход, влажность, температура, минеральных материалов; G_T, p_T, t_T, Q_H^P – соответственно расход, давление, температура, низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу; $G_{\text{B-X}}^r, p_{\text{B-X}}^r, t_{\text{B-X}}^r$ – соответственно расход, давление, температура воздуха, поступающего на горение топлива; $L_{\text{эл},2}, Q_{\text{ос},2}$ – соответственно энергия подводимая в форме работы и отводимая в окружающую среду в форме теплоты от 2-го блока; $L_{\text{эл},3}, Q_{\text{ос},3}$ – то же для 3-го блока; $G_{\text{д.г.}}, p_{\text{д.г.}}, t_{\text{д.г.}}$ – соответственно расход, давление, температура дымовых газов, покидающих блок №2.

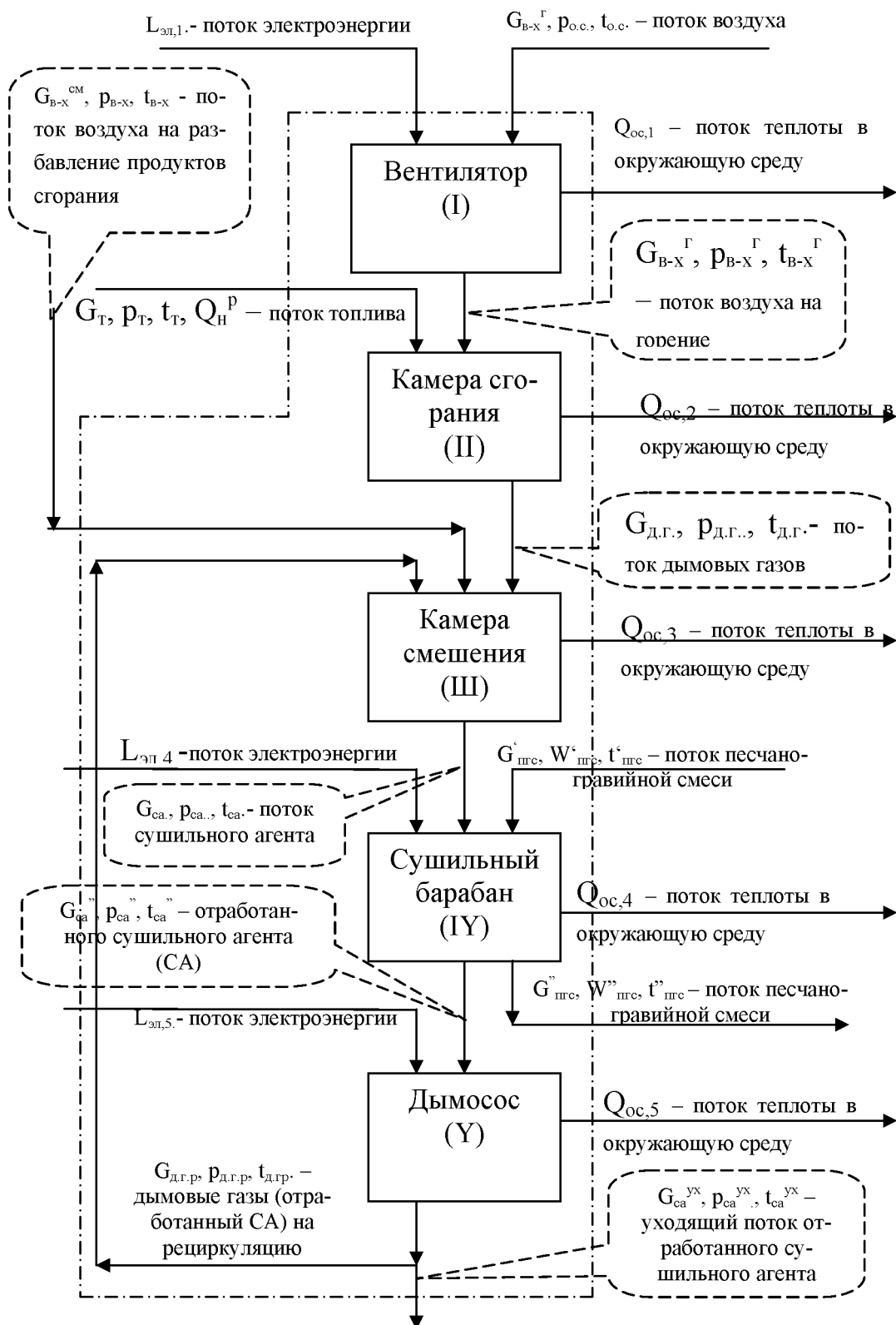


Рис.3.10. Структурная схема сушильно-нагревательного барабана с дымовыми газами в качестве сушильного агента

тем, понять основные системные закономерности, проявляющиеся в простых и в сложных структурах можно на примере простых структур. Характерными простыми структурами являются системы с последовательным и параллельным соединением элементов без промежуточных отводов и подводов эксергии, рис. 3.11.

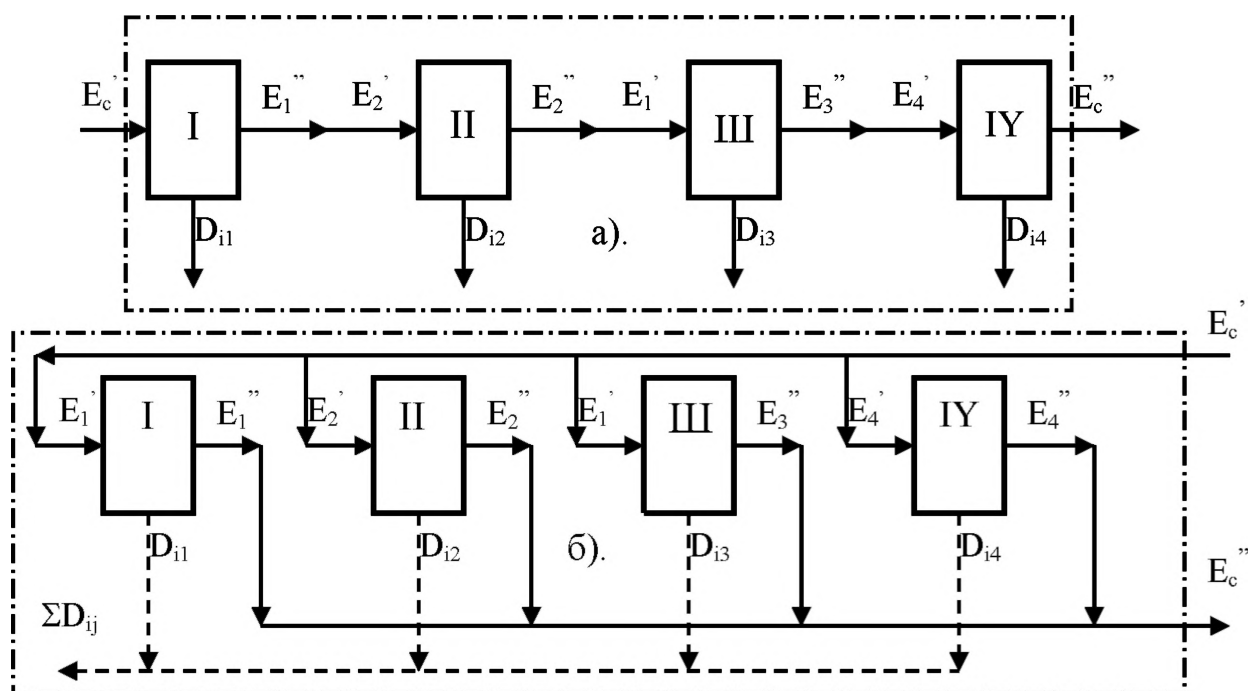


Рис. 3.11. Схемы простейших систем с последовательным (а) и параллельным (б) соединением подсистем: E – потоки эксергии; D – потери эксергии; входные потоки имеют в обозначении один штрих в верхнем индексе, выходные – двойной штрих в верхнем индексе; нижние индексы: c – система, i – внутренние потери, j , 1, 2, 3, 4 – номер блока и потоков.

Для схемы с последовательным соединением элементов существует простая зависимость между КПД_е каждого j -го элемента и КПД_е всей системы

$$\eta_{ec} = \eta_{e1} \cdot \eta_{e2} \cdots \eta_{en} = \prod_{j=1}^n \eta_{ej}, \quad (3.23)$$

где n – число элементов схемы.

Анализ формулы (3.23) показывает, что КПД_е отдельных элементов схемы с последовательным соединением равнозначимы. Изменение любого из них в K раз изменяет КПД_е системы в K раз.

Следует отметить отсутствие равно значимости потерь D_j в элементах схемы. Увеличение потерь на одну и ту же величину ΔD_j в разных подсистемах сопровождается различным изменением эксергетического входа системы $\Delta E_c'$ при сохранении

неизменным ее эксергетического выхода E_c'' . Это вытекает из соотношения (3.24) для расчета изменения входа системы при увеличении потерь в элементе с порядковым номером N

$$\Delta E_c^{(N)} = \frac{\Delta D_N}{\prod_{j=1}^N \eta_{ej}}. \quad (3.24)$$

Отношение $\Delta E_c^{(N)}$ изменения эксергетического входа системы, вызванного ростом потерь в элементе с номером N , к изменению $\Delta E_c^{(M)}$ эксергетического входа системы, вызванного ростом потерь на такую же величину в элементе с номером M (при этом $M > N$), называется коэффициентом преобразования эксергии и определяется

$$\delta = 1 / \prod_{j=N}^{M-1} \eta_{ej}. \quad (3.25)$$

Рассмотрим пример, в котором КПД_е каждого аппарата одинаковы и равны 0,5. Тогда увеличение потерь эксергии в четвертой подсистеме оказывается в 8 раз «дороже» чем такая же по величине потеря в первом блоке.

Из полученных результатов следует важный вывод об удорожании эксергии в технологической цепи по мере удаления ее от входа системы. Этот факт имеет естественное объяснение: единица эксергии последнего аппарата ограничена затратами в предыдущих элементах схемы и, естественно, стоит дороже.

Полученные результаты позволяют сделать практический вывод: в первую очередь проводить мероприятия по уменьшению потерь в блоках с большим коэффициентом преобразования эксергии, т.е. реализовывать мероприятия двигаясь с конца технологической цепочки к началу.

Этим схема с последовательным соединением отличается от схемы с параллельным соединением. В последней наблюдается абсолютная аддитивность потерь: изменение их величины в любом из блоков на какую-либо величину, приводит к равному изменению потерь и входа всей системы. Здесь необходимо в первую очередь проводить мероприятия по уменьшению потерь в блоках с большими затратами эксергии, т. к. в этом случае будет иметь место большее, по абсолютной величине, изменение входа. Последний вывод отражает зависимость

$$\eta_{e,c} = \eta_{e,j} \frac{\delta_j'}{\delta_j''}, \quad (3.26)$$

где η_e , $\eta_{e,c}$ – КПД_е соответственно всей системы и j-го блока; δ_j' , δ_j'' – эксергетический вес j-го элемента соответственно входной и выходной.

Для определения эксергетического веса элемента используются соотношения

$$\delta_j' = E_j' / E_c'; \quad \delta_j'' = E_j'' / E_c'', \quad (3.27)$$

где E_j' , E_j'' – соответственно эксергетические вход и выход j-го элемента; E_c' , E_c'' – соответственно эксергетические вход и выход системы.

Из зависимости (3.26) вытекает, что КПД_е элементов системы с параллельным соединением элементов неэквивалентны, поскольку изменение каждого из них приводит к изменению КПД_е системы тем больше, чем больше эксергетический входной вес элемента при неизменном выходе.

В заключение напомним сказанное ранее. И в схеме с параллельным, и в схеме с последовательным соединением окончательное решение принимается с учетом стоимости необходимых мероприятий.

Обобщение опыта, приведенное в литературе, оптимизации энергоиспользования в различных теплотехнологических системах и оптимизации процессов, характерных для технических систем, в дополнение к ранее сделанным практическим рекомендациям, позволило сформулировать ряд других важных выводов:

1. При наличии больших разностей движущих сил (Δp – разности давления, ΔT – разности температур, $\Delta \mu$ – разности химических потенциалов, определяемых составом), то ли срабатываемых, то ли создаваемых в системе, для уменьшения потерь необходимо использовать многоступенчатость проведения процесса. Наглядными примерами могут быть сжатие в многоступенчатом компрессоре, многоступенчатый подвод теплоты к газотурбинной установке, многоступенчатое выпаривание и пр.
2. Весьма эффективным является широкое использование интегрированных систем, когда объединяются различные технологические процессы в одной системе. Происходит комбинированный выпуск различных видов продукции, между которыми распределяются общие затраты. Это очень

мощный, действенный прием, который имеет большое будущее. В данном случае, фактически имеет дальнейшее развитие процесса вторичного энергоиспользования, когда поток энергии сбрасываемой из одной теплотехнологической установки утилизируется в другой теплотехнологической установке. Естественно, необходимо подбор теплотехнологий, взаимно дополняющих друг друга, сопрягающихся по характеристикам хотя бы по одному из сбросных и входных потоков.

3. Целесообразно организовывать взаимодействие прямых и обратных потоков, получившее название регенерации. Этот прием широко применяется в тепловых двигателях и ряде крупных теплотехнологий и характеризуется тем, что дает прямое снижение затрат первичного энергоресурса непосредственно в конкретной системе. Типичным примером является подогрев воздуха-окислителя за счет энергии дымовых газов огнетехнических установок.

Существенным достоинством применения эксергетического анализа можно отметить отсутствие необходимости создавать виртуальные моделирующие системы сравнения, поскольку в нем изначально заложена идея определения минимально необходимых затрат проведения каждого теплотехнологического процесса.

3.5. Иерархические уровни энергетического обеспечения технических систем

Всякая техническая система вообще и теплоэнергетическая система в частности, представляют собой единый комплекс взаимозависимых подсистем, технологий, процессов с различными внутренними и внешними связями. Для изучения и понимания таких систем, необходимых для принятия верных решений, рекомендуется использовать методологию системного подхода исследования сложных систем. Одним из основных ее приемов является *выделение в сложной системе нескольких уровней иерархии*. Далее для каждого уровня иерархии проводится независимое исследование с учетом ограничений, которые накладывает на данный уровень иерархически вышестоящие подсистемы. На рис. 3.12 приведен пример иерархической структуры теплоэнергетической системы производства. В современных условиях

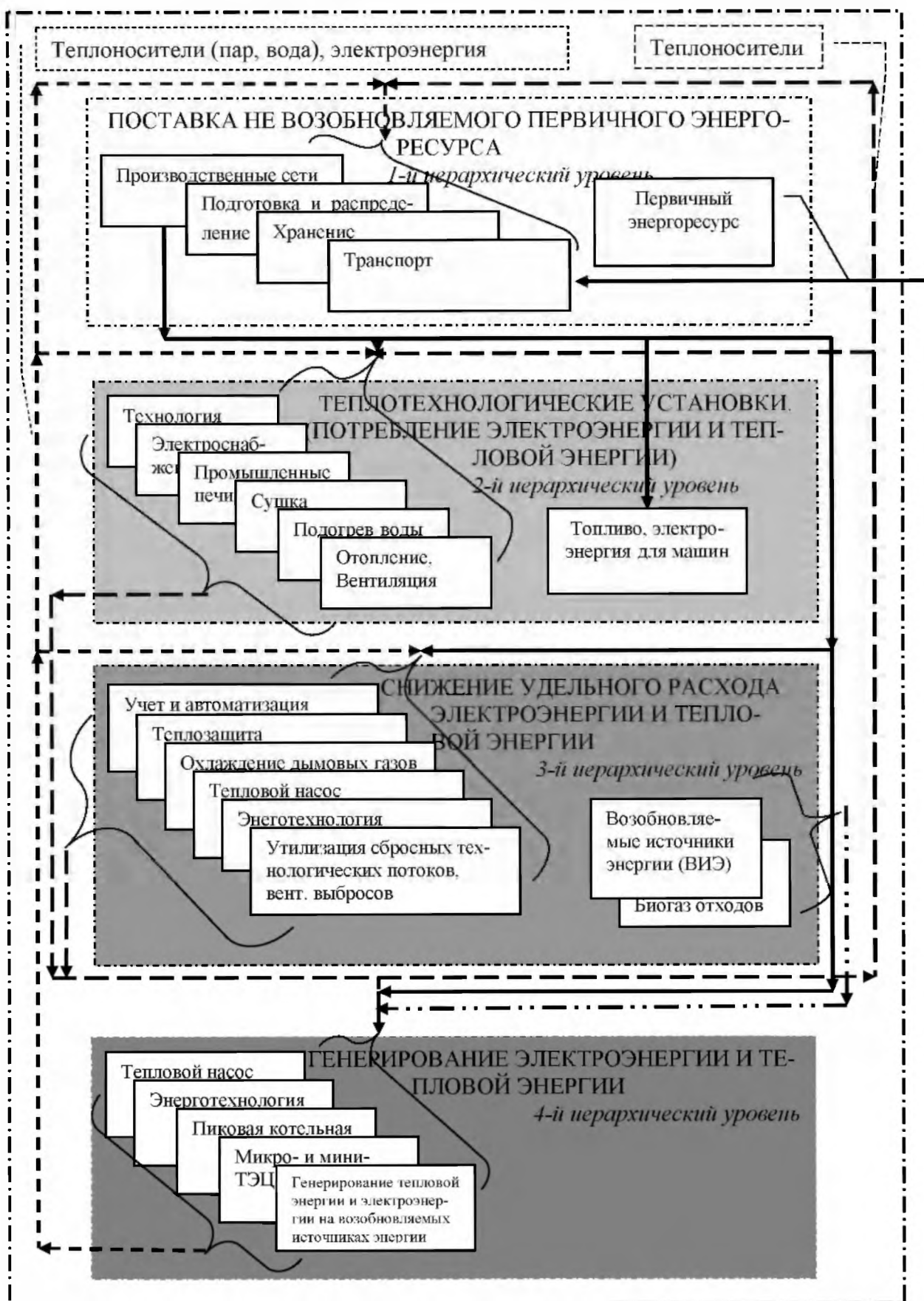


Рис. 3.12. Структурная схема теплоэнергетической системы, с разнесением ее подсистем по иерархическим уровням

приобретает особую важность правильный выбор первичных энергоресурсов в кон-

кретном месте и в конкретное время.

Выбор и поставка первичного энергоресурса для условий данного административно-хозяйственного района, транспортировка энергоресурса до объекта, хранение его на объекте, подготовка, распределение – проблемы, обладающие самым высоким приоритетом, т.е. главенствующие, решаемые в первую очередь. С учетом результатов данного приоритетного уровня разрешаются прочие задачи более низкого приоритетного уровня. Выбор вида и зон применимости первичных энергоресурсов объекта представляет достаточно сложную задачу с несколькими переменными. Среди определяющих факторов следует выделить объем годового энергопотребления, наличие в регионе необходимой инфраструктуры и удаленность объекта от опорного пункта энергоснабжения. Чем более удален объект от опорного пункта поставки энергоресурса, и чем меньше его потребность в энергоресурсе, тем более автономной оказывается его энергосистема.

На следующем, более низком иерархическом уровне системы энергоснабжения, находится выбор структуры подсистемы непосредственного теплотехнологического энергоиспользования, ради обеспечения функционирования которой и создается система. Если она удовлетворяет ограничениям вышестоящего уровня, то все остальное должно быть подчинено созданию условий по выпуску качественной и дешевой продукции с вредным минимальным воздействием на окружающую среду. Последнее находится в сильной зависимости от расхода энергоресурсов.

Во многом вопросы энергосбережения пересекаются с экологическими проблемами. Экологический ущерб, например, от тепловых сбросов пропорционален эксергии неиспользуемых потоков теплоты.

Один из путей снижения себестоимости продукции - уменьшение энергетической составляющей себестоимости. Поэтому при разработке теплоэнергетической системы объекта на уровне, непосредственно следующем за теплотехнологическим иерархическом уровнем, располагаются подсистемы, направленные на снижение энергопотребления. Здесь возможна обратная связь, в результате которой могут корректироваться параметры теплоносителей, параметры и схемы технологических потоков и пр. Ниже это будет показано на примере асфальтобетонного производства.

На более нижнем уровне иерархии находится подсистема теплоэнергетической поддержки работы теплотехнологического оборудования. Она должна поддерживать требуемые параметры и расходы энергоносителей независимо от работы оборудования, снижающего потребление первичных энергоресурсов. Наиболее простым примером может быть использование ВИЭ (ветровой и солнечной энергии) в системе энергообеспечения. При отсутствии ветра, при пасмурной погоде необходимо поддержание теплотехнологического процесса. «Подхватывать» возможные провалы выработки энергоресурсов на третьем иерархическом уровне и обеспечивать стабильное энергоснабжение – задача данного иерархического уровня. Здесь очень сложным выбором является соотношение генерирующих мощностей третьего и четвертого уровней. Резерв в 100% нерационален по двум причинам: имеет место фактическое «замораживание» вложенных средств, поскольку резерв большей частью простаивает; создаются условия для отключения усложняющего эксплуатацию энергосберегающего оборудования, что рано или поздно и происходит. Видимо, все-таки, теплотехнологическое оборудование и энергосберегающее оборудование не должно иметь возможности автономной работы.

Пути повышения энергоэффективности той или иной технологии известны:

- 1) повышение показателей (КПД или удельные расходы топлива) отдельных энергопотребляющих теплотехнологических агрегатов и отдельных агрегатов, генерирующих различные энергоресурсы;
- 2) вторичное энергоиспользование;
- 3) рациональное построение всей теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСПП);
- 4) динамическое регулирование процессов на базе полной автоматизации управления.

Промышленным теплоэнергетикам до настоящего времени были доступны два первых направления: это вопросы утилизации ВЭР, да предоставлялась лишь некоторая инициатива в повышении КПД энергоиспользующих теплотехнологических установок на стадии эксплуатации. И те, и другие имеют свои сдерживающие аспекты, достаточно изучены, и в этой связи, в определенном смысле представляют меньший интерес. Оставляя рассмотрение этих путей для следующих разделов, ос-

тановимся частично на рациональном построении ТЭСПП, поскольку оно вытекает из рассмотрения вопросов данной главы, которые следует подытожить. Кроме того, основные возможности снижения потребления первичных энергоресурсов в рамках конкретных технологий сегодня связаны с рациональным, с энергетической точки зрения, построением ТЭСПП. Возможности эти в целом оцениваются в $5 \cdot 10^1$ % текущего потребления первичных энергоресурсов.

ТЭСПП представляет собой сложный комплекс технологических агрегатов и энергоустановок различного назначения, которые весьма жестко связаны, в том числе, и разнообразными потоками энергии, как потребляемыми, так и генерируемыми. Примером объектов с достаточно эффективным построением теплоэнергетической системы являются тепловые электростанции (ТЭС), где основной эффект дает должная организация тепловых схем вообще наряду с совершенствованием отдельных единиц оборудования. ТЭС не являются простой суммой котлоагрегатов, турбоустановок и пр., а сложная система преобразования энергии с многочисленными обратными связями, индивидуальными проблемами и специфическими закономерностями. Соответствующее построение ТЭСПП объективно является намного более сложной задачей поскольку:

- 1) необходимо увязать энергопотоки значительно большего числа и намного более разнообразной природы;
- 2) энергоресурсы отличаются намного большим числом видов, характеристик и графиков;
- 3) графики потребления и генерации энергоресурсов диктуются технологическими процессами, которые могут прерываться и, в большинстве случаев, не могут изменяться в сторону, благоприятную для ТЭСПП;
- 4) технологические подсистемы, чаще всего, потребляют одни, а вырабатывают иные энергоресурсы с изменяющимися характеристиками, которые, ко всему, можно использовать в других подсистемах, работающих по своему графику. Возникающий, как следствие, дисбаланс требует усложнения структуры ТЭСПП;
- 5) проектирование рациональных ТЭСПП невозможно по широко используемому принципу «как там», по волевому принципу и технико-экономических расчетов с целевыми функциями кратковременного характера;

- б) непригодность для проектирования данных среднего характера за тот или иной период времени. Требования бесперебойности энергоснабжения, отсутствия дисбалансов предполагают предварительный мониторинг объекта, что в принципе невозможно при проектировании. Решения в условиях неопределенности информации не отработаны и не лишены риска, а потому, вполне обоснованно, отвергаются в большинстве случаев;
- 7) до настоящего времени нет полноценного критерия рационального построения ТЭСПП.

Вместе с тем, рациональное построение ТЭСПП сегодня безальтернативно для любых технологий. Учитывая указанные трудности его создания, в сугубо энергетическом аспекте следует:

Использовать иерархический принцип создания ТЭСПП, (рис.3.12), когда собственные энергогенерирующие мощности, отделенные непосредственно от технологического процесса, вводятся в ее структуру лишь для покрытия дисбалансов.

Применять компоновку оборудования, позволяющую реструктуризацию ТЭСПП после эксплуатации объекта в течение определенного отрезка времени, необходимого для мониторинга системы и индивидуальной оптимальной доработки состава подсистем. Из последнего вытекает необходимость многоэтапного финансирования создания объекта.

Блокировать пути потерь эксергии на всех стадиях протекания теплотехнологических процессов, прежде всего интеграцией взаимодополняющих теплотехнологий с большими внутренними потерями эксергии у одной на горячем, у другой - с большими внешними потерями эксергии на холодном торцах технологического процесса.

Рационализация ТЭСПП приводит к ее энерготехнологическому построению, при котором энергетическое обеспечение технологического процесса сопровождается минимальным потреблением внешнего первичного энергоресурса и воздействием на окружающую среду.

Наибольшие возможности для экономии энергии в промышленности следует отнести на счет многократного использования энергии. Среды с большими температурами и давлениями способны и должны производить полезную работу и отдавать

теплоту процессов конденсации и пр., которые расходуются на технологические нужды, а не рассеиваются в окружающей среде. В пределе, в теплотехнологической системе с совершенным энергопотреблением, не должна извне потребляться электроэнергия и не должна рассеиваться теплота процессов конденсации и охлаждения сред. *Сжигание топлива только для получения теплоты или использование электроэнергии для получения теплоты несовместимо с понятием совершенной системы энергопотребления.*

Анализируя баланс энергии нельзя не отметить, что энергия потребляемая и энергия выделяемая той или иной технологической системой одинакова и ее можно использовать повторно, если обеспечить требуемый температурный уровень.

4. Снижение энергопотребления в дорожном строительстве и при производстве железобетонных изделий

4.1. Производство железобетонных изделий

Общие сведения. Сборные бетонные и железобетонные изделия (ЖБИ) и конструкции изготавливают в республике более $1 \cdot 10^1$ предприятий разного подчинения. Как правило, применяются три вида организационно-технологических схем: агрегатно-поточная, конвейерная, стендовая. По первой схеме, где тепловая обработка изделий осуществляется в ямных камерах периодического действия, выпускается около $8 \cdot 10^1$ % всех ЖБИ. Общее число пропарочных камер оценивается в $2 \cdot 10^3$, общий их объем – $0,13 \cdot 10^6$ м³, возможный объем производства оценивается в $5 \cdot 10^6$ м³ (сегодняшняя загрузка составляет около $5 \cdot 10^1$ %, что усугубляет ситуацию). На долю второй схемы, где тепловая обработка протекает в туннельных пропарочных камерах, приходится около 5% ЖБИ. Около $5 \cdot 10^1$ % ЖБИ выпускается в условиях полигонов. Основным теплоносителем при тепловой обработке бетона является водяной пар. Удельный расход энергии на предприятиях сборного железобетона в среднем составляет 1,7 ГДж/м³, вместе с тем, отдельные предприятия могут иметь данный показатель намного хуже, в несколько раз превышающий технически обоснованные нормы. Нерациональное использование тепла из-за несовершенства систем тепловой обработки, использования нерациональных тепловых режимов (отсутствие систем контроля и автоматизации технологического процесса) оценивается в 75%. Такой результат объясняется многими причинами и, прежде всего, низкой степенью заполнения камер тепловой обработки железобетонными изделиями. При средней ее величине 0,09 (не редко можно встретить и величину 0,05) в структуре расходной части энергобаланса доминирует расход энергии на нагрев самих камер.

В дорожной отрасли ЖБИ в сравнении с АБС занимают несоизмеримо скромное место в продукции производственных предприятий дорожной отрасли. Однако ситуация с энергопотреблением при производстве ЖБИ весьма напряженная, поскольку перерасход энергии оценивается величиной 200–300%. Ситуация усугубляется доминированием устаревших технологий и марок самого цемента в производ-

стве ЖБИ, когда состав бетона определялся не из общего экономического эффекта, а из минимума расхода цемента.

Пути снижения потребления энергоресурсов в производстве ЖБИ можно разбить на две группы:

1. сугубо технологические, связанные с внедрением передовых технологий и пересмотра нормативной базы;
2. сугубо энергетические, связанные с энергообеспечением выбранного технологического процесса.

В первую группу входят:

- выпуск цементов, обеспечивающих снижение энергозатрат при производстве сборного железобетона;
- совершенствование конструктивных и организационно-технологических систем тепловой обработки бетона;
- модифицирование бетона химическими добавками и тонкодисперсными наполнителями;
- повышение качества заполнителей;
- совершенствование нормативной базы.

Второй группе посвящена, как ранее отмечалось, вся данная работа. Здесь лишь будут рассмотрены специфические аспекты энергообеспечения теплотехнологического процесса производства ЖБИ.

Производство цементов, обеспечивающих снижение энергозатрат при производстве сборного железобетона. Роль цемента в создании энергосберегающей технологии изготовления ЖБИ является определяющей. Суммарные затраты энергоресурсов резко увеличиваются при повышении марки бетона и соответственно расхода цемента. На долю цемента приходится до 75% энергозатрат, требуемых на один кубический метр бетона. Затраты на тепловую обработку занимают второе место и составляют около 25%, понижаясь с увеличением марки бетона.

Необходимо отметить, что цементы одной и той же марки различных заводов-изготовителей ведут себя по-разному в одинаковых условиях твердения. Активность цемента при пропаривании может колебаться от 15 до 43 МПа, а коэффициент активности при пропаривании от 0,38 до 0,9 ($K = R_{ч}^{np} / R_{ч}^{28}$) и не зависит от марки и ви-

да цемента. Эта же зависимость активности цемента к двадцати восьми суточной сохраняется и в ранние сроки твердения (1,2 и 3 суток). Существующая классификация цементов по активности при пропаривании выделяет их в три группы:

- высоко эффективные, с коэффициентом активности более 0,68;
- средне эффективные, с коэффициентом активности 0,57 - 0,67;
- низко эффективные, с коэффициентом активности менее 0,57.

Различие свойств цементов определяется качеством сырья, химическим и минералогическим составом клинкера, количеством и видом минеральных добавок, тонкостью помола цемента.

От качества сырья и уровня технологии зависит фазовый состав цемента. По названию минералов в клинкере образуются фазы алита, белита, алюмоферрита кальция и др. В цементном клинкере минералы не существуют в чистом виде. Примеси металлических и неметаллических оксидов в значительной степени влияют на свойства минералов.

На свойства цемента влияет содержание свободных оксидов CaO, MgO. Превышение их выше нормируемых значений приводит, как правило, к неравномерности изменения объема цемента при его гидротации.

Большое содержание щелочей может привести к реакции с реакционно способным кремнеземом в заполнителях.

Интенсивность твердения отдельных минералов, образующихся в клинкере, неодинакова. По интенсивности твердения минералы характеризуются следующими показателями в трех суточном возрасте при одинаковой тонкости помола: алит – 57, белит – 14, трехкальциевый алюминат – 100, четырехкальциевый алюмоферрит – 80 процентов от 28-дневного возраста. Учитывая количество минералов в клинкере – основном минералом, влияющим на интенсивность твердения, следует считать алит. Установлено, что смесь из 85% алита и 15% трехкальциевого алюмината, показывает значительно большую прочность.

Имеются данные, что при наличии в шихте хлоридов образуется новый вид силиката кальция – минерал алинит. Хлориды могут участвовать в образовании фаз типа $11\text{CaO}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaCl}_2$, присутствовать в виде изоморфной примеси в решетках бе-

лита и алюмоферритов кальция. Скорость гидратации такого цемента в начальный период выше, чем у алита.

Оптимальный состав и соответствующая высокоэффективным цементам микроструктура клинкера зависят не только от правильности расчета сырьевых материалов, но и от всего комплекса производственных факторов, к которым относят: однородность сырьевой смеси, равномерный обжиг при оптимальной температуре, своевременное охлаждение, тонкость помола.

На скорость и степень гидратации цемента в значительной степени влияет тонкость помола цемента.

Процесс измельчения клинкера может быть условно разделен на три стадии:

1. стадия, связанная с дефектностью структуры клинкера (пористость, трещиноватость и пр.);
2. стадия, связанная с микроструктурой клинкера (форма, размеры, характер срастания кристаллов);
3. стадия, характеризующаяся налипанием и агрегированием частиц при удельной поверхности более $(23 - 27) \cdot 10^1 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Алит и белит, как основные материалы, при одинаковой твердости, резко отличаются по хрупкости. Алит более хрупкий. При большем содержании белита больше проявляется эффект налипания и агрегирования.

Общепризнанного объяснения этого явления нет, но установлено влияние зарядов статического электричества, действие поверхностных и капиллярных сил притяжения и пр.

При помоле происходит не только разрушение образовавшихся при спекании структур, но помол обуславливает химические изменения материала. Тонкое измельчение кварца вызывает деформацию кристаллической решетки с образованием аморфного кремнезема – фактора активизации цемента.

Тонкость помола двояким образом улучшает качество цемента: во-первых, более тонкий цемент более равномерно распределяется на зернах заполнителей, во-вторых, увеличивается объем гидратированных частиц цемента. Тонкость помола, в свою очередь, связана с повышением износа и стоимостью эксплуатации мельниц. Сегодня принято: для обычных портландцементов тонкость помола (по воздухо-

проницаемости) составляет $(2,8 - 3,6) \cdot 10^2$ м²/кг, для быстротвердеющих тонкость помола несколько выше $(4,0 - 4,8) \cdot 10^2$ м²/кг.

Тонкость помола влияет на прочность, прежде всего в раннем возрасте. Вместе с тем, существует оптимальный предел, выше которого измельчение нецелесообразно по технико-экономическим показателям.

С учетом изложенного, по активности структура цементов используемых в РБ следующая: высокоактивных потребляется до $2 \cdot 10^1$ %, среднеактивных – до $5 \cdot 10^1$ %, низкоактивных – $3 \cdot 10^1$ %. Содержание алита в среднеактивных цементах Волковысского завода около 58-62%, в низкоактивных цементах Кричевского завода 54 – 58%.

Диапазон основных физико-технических показателей используемых цементов может быть представлен:

- предел прочности при сжатии в 28 дневном возрасте (марка) 300, 400, 500, 600, в первую очередь 400, 500;
- предел прочности при сжатии в 3-х суточном возрасте – 15 – 38 МПа;
- активность при пропаривании – 22 – 38 МПа;
- нормальная плотность – 23 – 31%
- сроки схватывания: начало 1 час 50 минут – 5 часов 50 минут; конец – 3 часа 20 минут – 8 часов 45 минут;
- тонкость помола – 280 – 480 м²/кг.

Цементы, используемые в РБ, как правило, содержат минеральные добавки до $2 \cdot 10^1$ %, которые снижают скорость твердения цемента в ранние сроки. Наиболее часто встречающиеся добавки: трепел, шлаки, опока.

Добавки снижают достигаемые показатели по энергопотреблению или по прочности бетона в ранние сроки твердения, что установлено исследованиями БелНИИС по созданию энергосберегающей технологии.

Цементы Волковысского завода более эффективны в технологии изготовления конструкций без тепловой обработки или с применением тепловой обработки при температурах до 60 °С, а также при сокращении длительности режима тепловой обработки, вплоть до полного исключения изотермического периода.

Для успешного развития энергосберегающих технологий на предприятиях стройиндустрии целесообразно на цементных заводах Беларуси совершенствовать технологию производства с целью получения цементов с высокими показателями активности в ранние сроки твердения в направлениях:

- исследование сырьевых ресурсов на пригодность их применения в качестве добавок к шихте с целью производства цемента высокой и средней эффективности (I и II группы);
- увеличение производства бездобавочных цементов;
- увеличение тонкости помола цементов.

Высокие требования к физико-химическим свойствам цементов, ускоренным темпам твердения, сокращению либо отказу от тепловой обработки при изготовлении ЖБИ, сокращению расхода цемента объясняют усилия, которые направлены сегодня на разработку цементов нового поколения особо быстротвердеющих, сверхбыстротвердеющих, тонкомолотых, вяжущих низкой водопотребности и пр.

Модификация бетона химическими добавками и тонкодисперсными наполнителями. Применение химических добавок в производстве ЖБИ характеризуется разнообразием и широким масштабом во всех технически развитых странах, где уже сегодня до 80% железобетонных конструкций производится с применением химических добавок. В РБ доля аналогичного производства оценивается сегодня 25%. По прогнозам ведущих специалистов, в ближайшем будущем весь объем сборных ЖБИ будет выпускаться с применением химических добавок. Применение химических добавок в производстве ЖБИ в летнее время исключает тепловлажностную обработку. В зимний период на проведение тепловлажностной обработки снижается расход энергии в 3 – 4 раза и составляет величину 0,8 – 0,5 ГДж/м³.

Проблема химизации бетона в РБ решается за счет промышленной реализации новых композиций бетона и технологических приемов интенсификации процессов твердения с использованием теплоты реакций гидратации цемента, при этом существует два технических направления.

Высокой эффективностью отличаются синтезированные анионоактивные добавки – суперпластификаторы: нафталин и меламин формальдегидного типа. Эти добавки революционизировали технологию монолитного и сборного бетона и железобетона.

бетона. При неизменных водоцементных соотношениях и прочности бетона увеличивается подвижность бетонной смеси на порядок: с 2 до $2 \cdot 10^1$ сантиметров осадки конуса. При одинаковых расходе цемента и подвижности смеси снижается ее водопотребность на 20 – 25% и соответственно увеличивается прочность бетона. При неизменных кинетике твердения и прочности бетона до $3 \cdot 10^1$ % сокращается расход цемента.

Второе направление связано с применением электролитов-ускорителей процесса гидратации цемента и соответственно ускорителей твердения цементного камня при относительно низких температурах выдерживания.

Комплексное использование обоих вышеуказанных видов химических реагентов позволяет получить наибольший результат, поскольку при снижении водоцементного отношения бетонной смеси имеет место повышение эффективности применения электролитов. Комплексное применение химических реагентов необходимо и потому, что однокомпонентные пластифицирующие добавки типа ЛСГ, С-3 и др., получаемые из попутных продуктов лесохимии, целлюлозно-бумажной, химической и нефтехимической промышленности, чаще всего вызывают замедление скорости протекания процессов гидратации цемента, особенно в начальных стадиях. Полифункциональные комплексные добавки позволяют сохранить приемлемую укладываемость смеси и прочность бетона до 40Мпа за 18 часов нормально-влажностного твердения при весьма низких водоцементных отношениях ($\approx 0,28$).

Возможность достижения высоких прочностей бетона в нормально влажностных условиях твердения в течение одних-двух суток появляется при условии применения суперпластификаторов и ультрадисперсных кремнийсодержащих отходов ферросплавного производства. При содержании отходов до 10% и суперпластификаторов до 4% от массы цемента при марочной прочности 100Мпа получается бетон в суточном возрасте прочностью 29 МПа. Пластификатор МПС-1, кремнеземистая пыль газоочистки и ускоритель твердения – хлористый кальций позволяют в суточном возрасте достичь от $3 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^1$ % марочной прочности бетона.

В качестве ускорителей твердения могут применяться сульфаты натрия, аммония и железа, хлориды железа и кальция, поташ, нитраты железа и кальция, нитрат-нитрит кальция, нитрит-нитрат-хлорид кальция, нитрат и нитрит натрия, алюминат

натрия, тринатрийфосфат. К сожалению, указанные добавки дефицитны и, кроме сульфата натрия, не производятся в РБ.

Среди известных ускорителей твердения бетона наиболее эффективными являются хлористый кальций и хлористый натрий, позволяющие в три раза увеличить раннюю прочность бетона. Вместе с тем, их применение строго лимитировано и не допускается в предварительно напряженных конструкциях, поскольку имеет место ускоренная коррозия арматурной стали. Их применение, как правило, должно быть в комплексе с ингибиторами коррозии, которые весьма дефицитны. Имеются сведения о том, что свойствами ингибиторов коррозии стали обладают лингосульфонаты. Поиск условий применения хлорсодержащих добавок актуален для РБ и потому, что на ПО «Беларуськалий» накоплено огромное количество галитовых отходов, содержащих до 95% хлористого натрия. На основе этих галитовых отходов разработаны добавки, например, ЛМГ (лигносульфонаты технические модифицированные галитовым отходом). У этой добавки основным эффектом является пластифицирующее действие, побочный эффект – ускорение твердения. Изменение пропорций позволяет регулировать соотношение эффектов и достигать нужного технического результата на конкретных материалах для конкретных условий. Другим примером является добавка ХИТ (химический интенсификатор твердения), разработанная на основе растворимых и нерастворимых солей натрия и кальция. Ее применение повышает прочность бетона в ранние сроки твердения на $(1-1,5) \cdot 10^2\%$, что приводит к сокращению энергозатрат на тепловую обработку до $5 \cdot 10^1 \%$. Эффект усиливается при комплексном применении ее с добавками сильного водоредуцирующего действия. Достоинством перечисленных добавок является высокая обеспеченность местной сырьевой базой и возможность выпуска в порошкообразном виде. Последнее существенно снижает транспортные и эксплуатационные расходы. Создан ряд других добавок, позволяющих перейти к беспрогревной технологии производства сборных ЖБИ, поскольку в суточном возрасте позволяют без тепловой обработки получить $5 \cdot 10^1 \%$, а в двухсуточном – $7 \cdot 10^1 \%$ проектной прочности бетона.

Повышение качества заполнителей. Общеизвестно, что качество минеральных заполнителей оказывает существенное влияние на прочность бетона, особенно в раннем возрасте. Основными показателями качества в данном контексте являются

гранулометрический состав, пылеватые примеси, межзерновая пустотность, удельная поверхность.

Использование мелких и очень мелких песков Днепровско-Двинского речных бассейнов (модулем хрупкости 1,5 – 2,0) увеличивает на $1 \cdot 10^1$ % перерасход цемента, как ранее указывалось, основного энергоемкого материала. Использование таких заполнителей в РБ составляет около $5 \cdot 10^1$ % общего расхода. Анализ разведанных месторождений указывает на наличие должного количества месторождений песков требуемого гранулометрического состава для всех видов строительных работ. Необходимо соответствующее оснащение таких месторождений оборудованием для сортировки и промывки.

Лещадная форма щебня, пылевидность снижают прочностные показатели бетона в ранние сроки. Так наличие в щебне 35% процентов зерен лещадной формы обуславливает потери прочности бетона до $2 \cdot 10^1$ %. Использование гравия, находящегося на эксплуатируемых песчаных карьерах, позволяет не только сократить потребность в щебне и уменьшить объем транспортных перевозок, но и до $1 \cdot 10^1$ % уменьшить расход цемента. Сопутствующий энергетический эффект, в свете вышеизложенного, очевиден.

Совершенствование нормативной базы. Внедрение малоэнергоемких и беспроемных методов производства сборных ЖБИ требует пересмотра многих технологических регламентов, рекомендаций по выбору рациональных видов цемента, соотношения масс крупного и мелкого заполнителей, определению вида и содержания химических добавок и тонкодисперсных наполнителей, указаний по назначению и контролю режимов выдерживания бетона при низких положительных температурах, методов подбора состава бетона для достижения распалубочной, отпускной и проектной прочности бетона с учетом влияния комплексных химических добавок, минералогического состава и тонкости помола цемента, водоцементного отношения, температуры выдерживания на кинетику набора прочности во все сроки твердения бетона.

Необходимо пересматривать требования к выпускаемым цементам в отношении содержания минеральных заполнителей, улучшения минералогического состава добавок, оптимизации содержания гипса и щелочей, а также тонкости помола. Необ-

ходимо уточнить требования к распалубочной прочности бетона при двухстадийном выпуске ЖБИ (в пакетах форм и в распалубленном виде), дифференциация норм к отпускной прочности бетона в зависимости от вида конструкций и сроков приложения расчетной нагрузки в зданиях и сооружениях.

Необходимо изменить требования к качеству инертных заполнителей, разработать и стандартизировать экспресс-методы определения активности цемента в 28-суточном возрасте, а также в ранние сроки (суточные и двухсуточные). Это позволит проведение оперативной коррекции состава бетона и режимов выдержки ЖБИ.

Совершенствование конструктивных и организационно-технологических систем тепловой обработки бетона. Очевидно, что по разным причинам тепловлажностная обработка ЖБИ останется востребованной и, прежде всего, при производстве ответственных конструкций, которые характерны для дорожной отрасли. Взаимосвязанность успехов энергосбережения обоих направлений (сугубо технологических и энерготехнологических) не вызывает сомнений. Квалифицированная организация энергообеспечения теплотехнологического процесса позволяет снизить удельную потребность в первичном энергоресурсе при производстве ЖБИ в количестве, когда снижается на порядок острота вышеизложенных сугубо технологических вопросов. Собственно этой задаче, в первую очередь, и посвящено данное пособие. Соответствующие вопросы, необходимые для понимания возможных решений при энергообеспечении производства ЖБИ, рассмотрены в следующих разделах.

4.2. Снижение энергопотребления в дорожном строительстве

4.2.1. Общие положения

Энергопотребление в дорожном строительстве необходимо рассматривать как составную часть энергетического баланса жизнедеятельности страны. Такой комплексный подход для дорожной отрасли особенно важен еще и потому, что автомобильные дороги играют особую роль, влияя на все стороны жизни. Оптимизация процесса дорожного строительства в энергетическом плане должна рассматриваться более широко: автомобильная дорога создается как долговременное сооружение, предназначенное для транспортного обслуживания многих отраслей народного хо-

зайства. Поэтому энергопотребление дорожно-строительного производства должно минимизироваться без ухудшения показателей транспортно-эксплуатационных свойств дороги. Следует учитывать, что суммарное энергопотребление транспортного хозяйства всех отраслей несоизмеримо выше затрат дорожно-строительного производства, что состояние дорог в значительной мере определяет эффективность транспортных перевозок. В этой связи важно не допустить ухудшения характеристик дорожной сети, что чревато перерасходом энергии в дальнейшем в транспортной области. Например, организация пересечений дорог в разных уровнях сокращает расходы горючего до $3 \cdot 10^1$ %, а устройство объездов приводит к экономии горючего, которая обеспечивает покрытие примерно $2 \cdot 10^1$ % годовых строительных расходов.

Основные этапы дорожно-строительного производства представлены на рис. 4.1.

Очевидно, что общие энергозатраты на строительство автомобильной дороги состоят из следующих слагаемых:

- энергозатраты подготовки полосы отвода;
- энергозатраты на сооружение земляного полотна;
- энергозатраты работ по укладке конструктивных слоев дорожной одежды;
- энергозатраты строительства искусственных сооружений и обустройства автомобильной дороги;
- энергозатраты производства дорожно-строительных материалов.

Оптимизировать подобную систему по единой функции цели чрезвычайно сложно. Объективно, для столь долгоживущих объектов, это и невозможно, поскольку имеет место большая неопределенность долговременного прогнозирования ситуации. Наиболее взвешенным следует считать иерархический подход к решению данной задачи, когда имеющиеся факторы ранжируются по уровням. Тогда энергозатраты работ связанных с фактором верхнего уровня накладывают ограничения на минимизацию работ, относящихся к фактору нижнего уровня. В рамках безусловного выполнения этих ограничений верхних иерархических уровней минимизируются энергозатраты всех остальных.

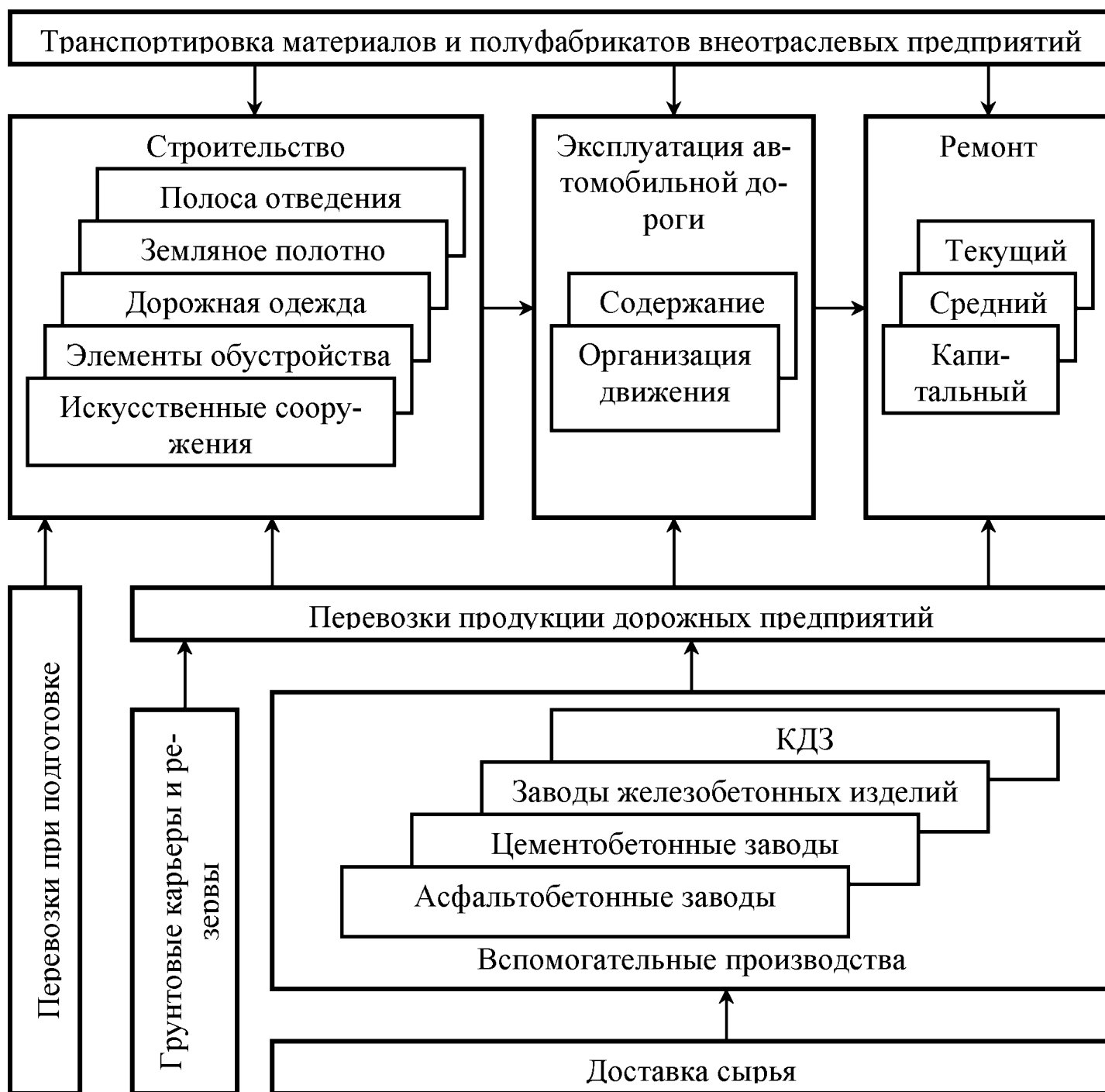


Рис.4.1. Основные этапы дорожно-строительного производства

4.2.2. Энергопотребление при транспортировании дорожной продукции

Плечо перевозок, вид применяемых транспортных средств – основные факторы транспортной составляющей энергозатрат, входящих в каждый из этапов, рассмотренных на рис.4.1. Многофакторность данной задачи делает практически невозможным ее точное решение. Загрузка транспорта, рельеф местности, скорость, условия дорожного движения и прочие, подчас субъективные факторы, как привычка

водителя. Речь может идти только об общих оценках, базирующихся на масштабах операций, норме расхода топлива данным типом транспортных средств и пр. Так для железнодорожного транспорта энергозатраты на перевозку одной тонны на один километр оцениваются в $6 \cdot 10^2$ кДж, для водного транспорта - $5 \cdot 10^2$ кДж, для автомобильного – менее $2 \cdot 10^3$ кДж на постоянных коммуникациях и $3 \cdot 10^3$ кДж – на временных. Учет транспортной составляющей энергозатрат требует наличие регулярно обновляемых таблиц энергопотребления по всем видам транспортных средств, где указывается распределение дорожного движения, потребление энергоресурсов всеми видами и типоразмерами транспорта, масса транспортных средств, перевезенная полезная нагрузка и общий километраж грузовых автомобилей с полезной нагрузкой и без нее.

Энергоемкость транспортирования тонны минеральных материалов оценивается в $0,7 \cdot 10^2$ МДж. Его отличают большие объемы и удаленность источников, что определяет доминирующую роль энергозатрат, связанных с их доставкой, которая превышает $6 \cdot 10^1$ %. При транспорте местных материалов данная составляющая несколько снижается, и не превышает $5 \cdot 10^1$ %. Приведенные величины зависят также от категоричности строящейся дороги и от объемов работ. Использование бензиновых двигателей увеличивает энергозатраты на транспорт на $3 \cdot 10^1$ %.

Значительные перерасходы энергии при транспортировании дорожных материалов на строительные объекты вызваны, как правило, с увеличением плеча перевозок, с ошибкой в подборе транспортных средств и их грузоподъемности, отсутствием прицепов и мощных современных тягачей, необходимых при больших объемах работ.

Энергоемкость перевозки прочих составляющих не превышает 15% общих энергозатрат и оценивается для битума величиной $1,5 \cdot 10^2$, стали - $1 \cdot 10^2$, цемента и извести – $0,5 \cdot 10^2$ МДж за тонну.

4.2.3. Энергопотребление строительного процесса

Энергопотребность непосредственно строительных работ складывается из таких слагаемых как: подготовка и возведение земляного полотна, устройство дорожной одежды, строительство искусственных сооружений и обустройство дороги (рис.4.1). Наиболее энергоемким, по общему признанию, является возведение земляного полотна и его уплотнение до требуемой величины плотности. Они складываются из многих составляющих, каждая из которых зависит от изменяющихся условий (конструкции земляного полотна, грунтово-гидрологических условий, рельефа, технологии работ и пр.). Вместе с тем, при возведении земляного полотна состав работ остается постоянным: подготовительные работы, основные работы по возведению насыпей и разработке выработок, отделочные работы.

Подготовительные работы включают восстановление трассы, отвод и закрепление земель, расчистку полосы отвода, разбивочные работы, устройство водоотводных канав и дренажей. Энергоемкость этих работ не превышает 5% энергоемкости всех земляных работ.

Наиболее энергоемки основные работы по разработке выемок и отсыпке насыпей, состоящие из таких технологических операций: рыхление и копанье грунта, транспортировка его в места отвалов или отсыпки, распределение и уплотнение грунта. Энергоемкость этих работ доходит до $(5 - 8) \cdot 10^1$ % энергоемкости всех работ по строительству автомобильной дороги. Для условий Минской области, в качестве примера, можно дать следующую структуру энергозатрат при возведении земляного полотна автомобильной дороги, рис.4.2.

Из анализа структуры энергозатрат следует, что основные усилия в отношении экономии топлива должны быть связаны с устройством земляного полотна и транспортированием грунта.

В технико-экономическое обоснование проекта организации работ и обоснование принимаемой конструкции обязательно должна входить энергетическая составляющая, учитывающая характеристики грунта, продольный и поперечный профиль, наличие местных строительных материалов и плечо их перевозки, условия строи-

тельства, климатические условия и пр. В частности, такая оценка на стадии земляных работ требует пооперационного учета энергопотребности:

- разработки и загрузки грунта, учет его природы, плотность, слипаемость и пр.;
- продольный профиль и дальность перевозок, сопротивление движению;
- уплотнение грунта, связанное с погодными условиями и характеристиками грунта.

Формализация организационно-технологических процессов в строительстве с

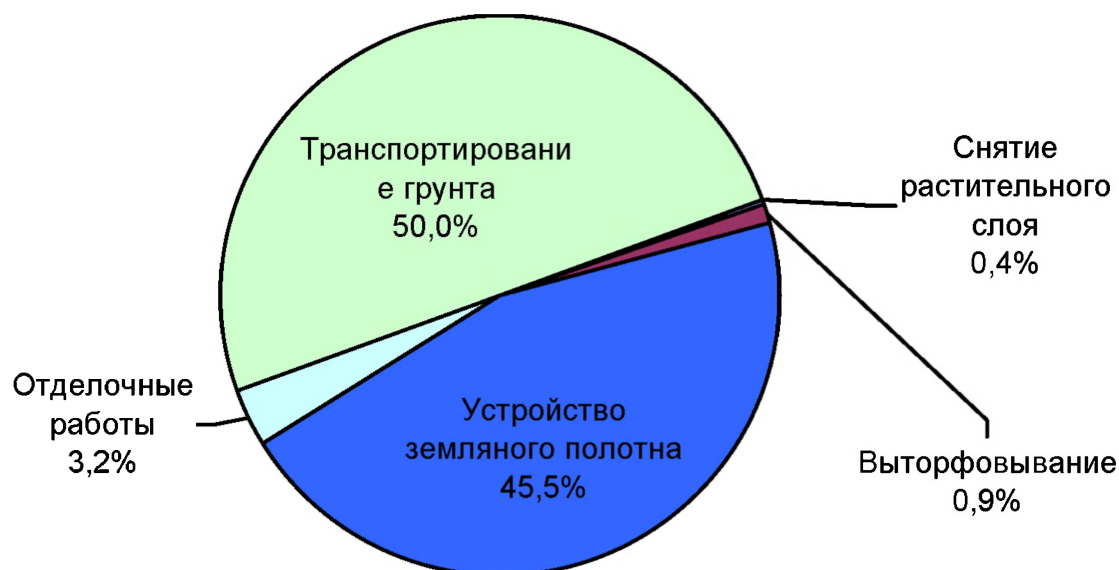


Рис.4.2. Структура энергозатрат по видам работ при возведении земляного полотна автомобильной дороги для условий Минской области

использованием комплексных моделей при производстве массовых земляных работ позволяет получить научно обоснованное решение столь непростой задачи. Ее решению посвящена докторская диссертация Я. Пшибыльского, защищенная в Белорусской государственной политехнической академии в 1999 году.

Энергозатраты напрямую зависят от дальности перевозки грунта, что иллюстрирует рис.4.3.

Энергоемкость укладки одного кубометра грунта оценивается в $9 \cdot 10^1$ МДж, перевозка его увеличивает это значение на 6 МДж с каждым километром пути.

Энергозатраты при сооружении дорожного полотна зависят от времени выполнения работ. Проведение работ в осенне-зимний период приводит к существенному перерасходу энергоресурсов. Оптимальное распределение работ в условиях РБ имеет следующую структуру по кварталам года: 1-й квартал – 15 – 15%; 2-й квартал – 30 – 31%; 3-й квартал – 32 – 33%; 4-й квартал – 20 – 22%.

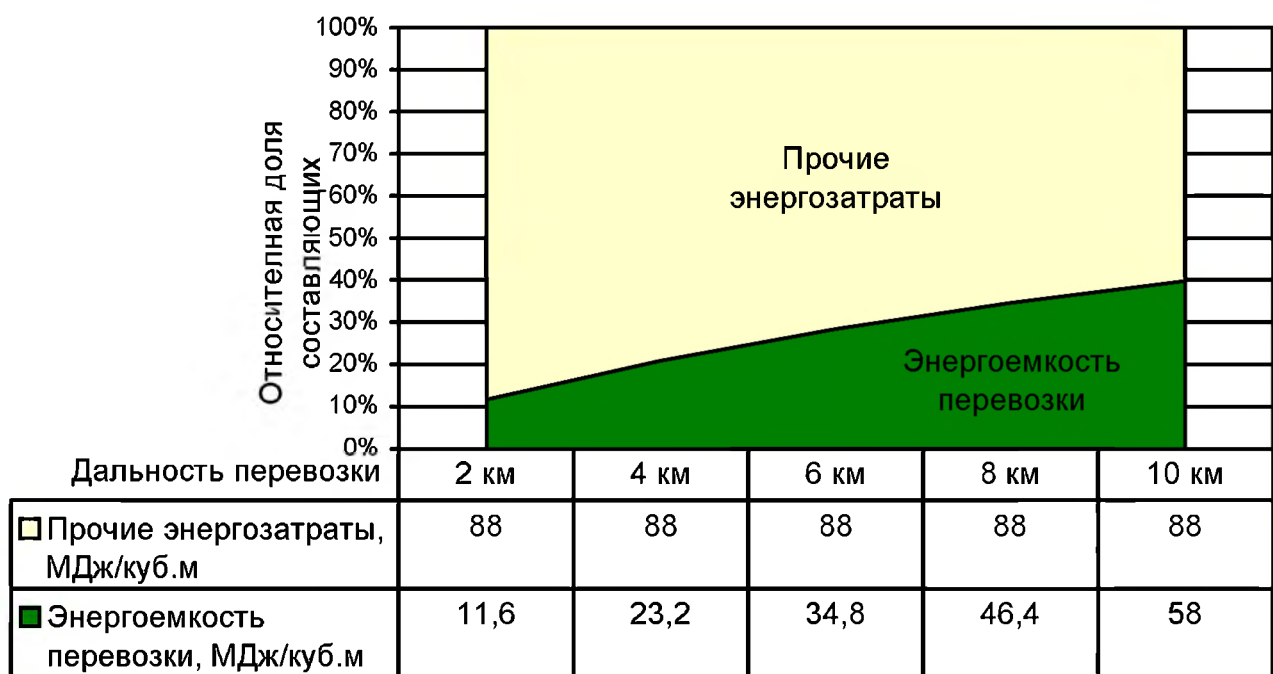


Рис.4.3. Изменение структуры энергопотребления возведения земляного полотна в зависимости от дальности перевозки грунта

Климатические условия (прежде всего водный баланс) могут увеличивать энергозатраты земляных работ в 2-7 раз, что требует тщательного обоснования переноса сроков работ на зимний период.

Сбалансированный состав дорожно-строительного отряда и правильная его организация, снижение плеча перевозки грунта, благоприятные сезоны проведения работ – основные факторы снижения энергозатрат строительства земляного полотна.

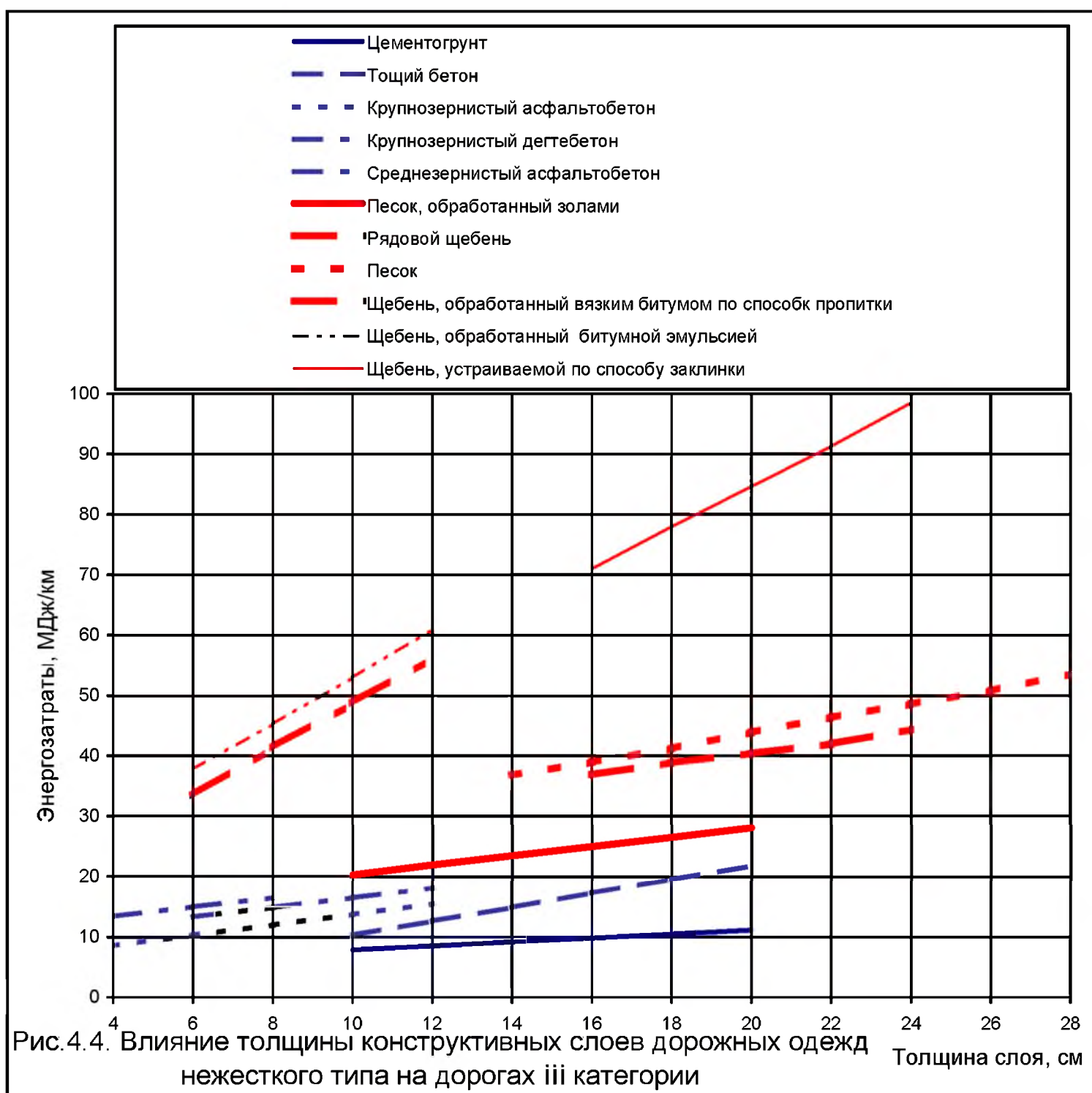
Дальнейшее строительство дороги связано с устройством дорожной одежды и конструкцией последней определяет энергоемкость работ.

Изменение энергоемкости, в зависимости от толщины конструктивных слоев дорожной одежды, приведено на рис.4.4, 4.5.

Из приведенных данных следует, что создание цементобетонных слоев более энергоемко, вместе с тем, общие затраты энергии на создание цементобетонных покрытий оказываются меньшими.

В дорожных одеждах рекомендуется сочетать энергоемкие слои со слоями малой энергоемкости, что снижает расходы энергии при прочих равных условиях. Например, жесткие слои сочетаются с нежесткими, энергоемкий слой щебня по способу заклинки с укрепленными слоями.

При укладке материалов объемы потребляемого топлива зависят от многих факторов, что делает целесообразным введение коэффициентов потребления топлива для оценки уровня использования того или другого его вида, таблица 4.1.



Осредненные удельные расходы энергии на приготовление, транспортирование и укладку материалов (таблица 4.2) позволяет оценить энергоемкость того или иного конструктивного слоя одежды.

Так называемое, горячее приготовление материалов имеет энергоемкость порядка $3 \cdot 10^2$ МДж/т, при холодной обработке материалов ее величина снижается до $1 \cdot 10^1$ МДж/т. Энергоемкость укладки колеблется в пределах $(1 - 2) \cdot 10^1$ МДж/т, мало изменяясь при укладке однородных материалов.

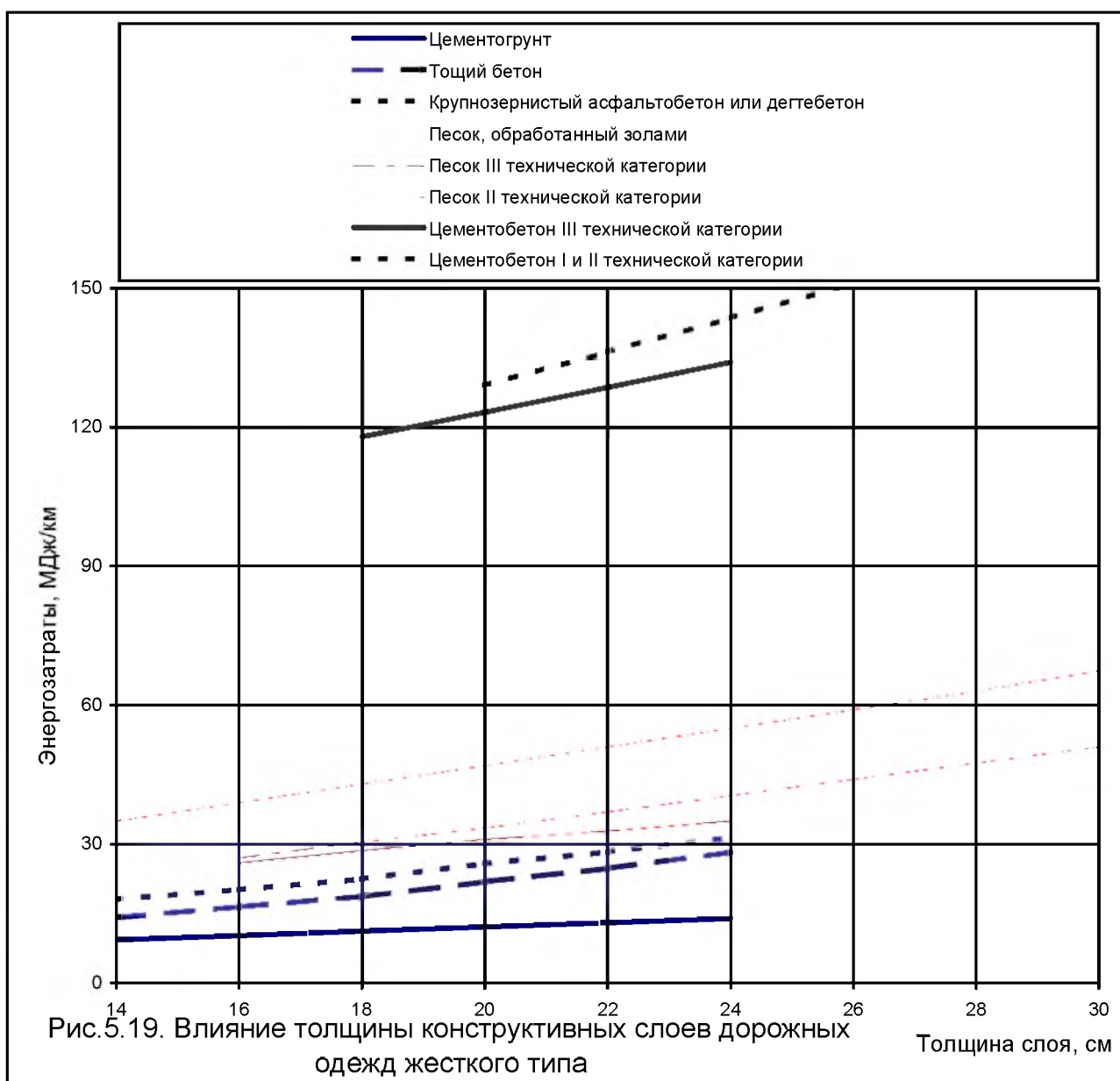


Таблица 4.1

Показатели потребления топлива при укладке материалов

Вид работы	Дизельное топливо			Бензин		
	Удельное потребление					
	низкое	среднее	высокое	низкое	среднее	высокое
Укладка асфальтобетонных смесей, л/т	0,25	0,58	0,83	0,33	0,58	0,91
Укладка цементобетонных смесей, л/м ³	0,64	1,08	1,53	0,69	1,14	1,88

Таблица 4.2

Энергоемкость материалов и операций по их изготовлению и укладке

Материал	Энергоемкость, МДж/т				
	материалов		изготовления а/б смеси	укладки асфальто-бетонной смеси	общая (С учетом транспортирования материалов с одного объекта. Битум учтен только с затратами энергии на АБЗ)
	минеральных	вяжущих			
Асфальтобетон	149	46,5	$3,2 \cdot 10^2$	18	$6,3 \cdot 10^2$
Асфальтобетон на АБЗ с энерготехнологическим обеспечением техпроцесса	149	46,5	$0,9 \cdot 10^2$	18	$4 \cdot 10^2$
Гравий, обработанный					
битумом	92,6	29,8	314	14,6	503
эмульсией	90,9	51,1	10,4	12,6	$2,1 \cdot 10^2$
цементом	86,3	136	10,4	12,6	293
шлаком	66,2	84,6	10,4	12,6	230
дробленным шлаком	77,9	74,2	10,4	12,6	230
пуццоланом	64,5	188	1,4	12,6	272
Цементобетон	103	545	10,4	8,4	712
Тощий бетон	82,5	293	10,4	8,4	440
Пористый бетон	82,9	311	10,4	10,5	461
Песок, обработанный					
цементом	46,5	233	12,6	10,5	256
шлаком	37,7	91,8	12,6	10,5	209
Необработанный гравий	88,8	-	-	10,5	105
Необработанный гравий (на станции)	88,8	-	8,4	10,5	168
Несортированный материал	41,9	-	-	12,6	62,8

Энергоемкость работ по устройству дорожной одежды, как и в случае создания земляного полотна, зависит парка дорожных машин, их производительности, объема работ, климатических условий (прежде всего температуры воздуха). При неблагоприятных температурных условиях энергозатраты увеличиваются на $2 \cdot 10^1$ %.

Структура энергозатрат строительного процесса представлена на рис.4.6, в зависимости от категории дороги статьи могут колебаться в указанных пределах.

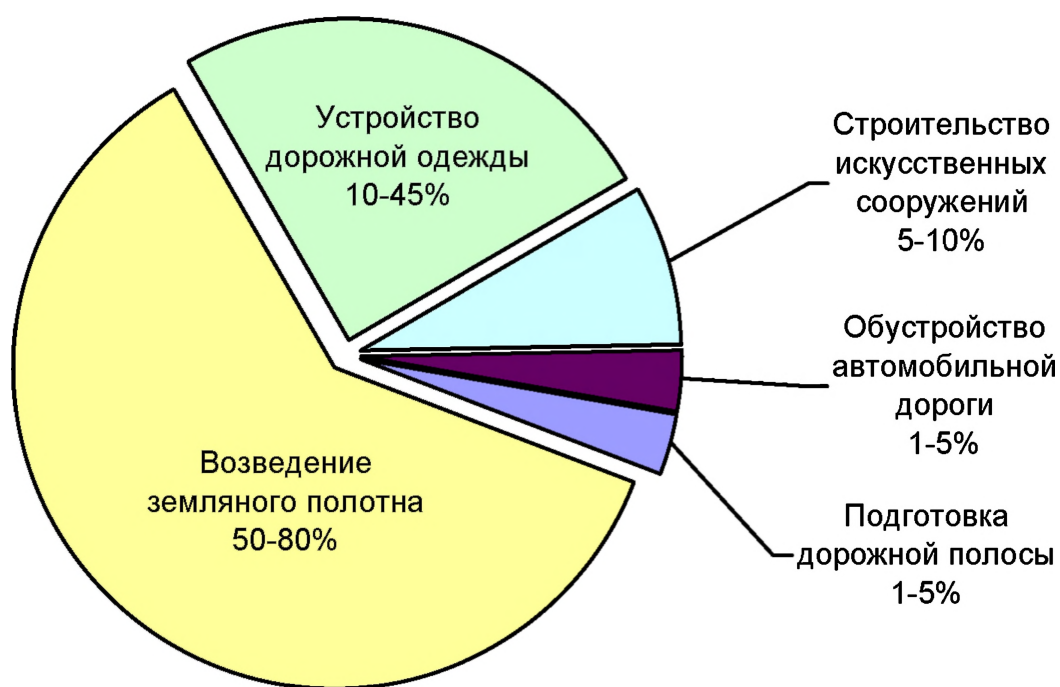


Рис.4.6. Структура энергозатрат при строительстве автомобильной дороги

Снижение энергоемкости дорожных одежд лежит на пути широкого использования местных материалов, перестройки парка дорожных машин, расширения применения холодных технологий и, наконец, энерготехнологической перестройки производственных предприятий дорожной отрасли. Вместе с тем, очевидна необходимость учета энергозатрат в последующий период на проведение ремонтных работ. Объем последних доходит до $6 \cdot 10^1\%$ объема начальных вложений.

Возможны два вида стратегий строительства. Первая основывается на таком выборе решений, когда в последующем требуется только мелкий ремонт без укладки толстых слоев новых материалов. По другой стратегии предусматривается стадийное строительство, в ходе которого требуются относительно меньшие начальные капиталовложения при больших объемах работ в будущем, связанных с регулярной укладкой новых слоев материалов. С течением времени, по мере усиления дорог, возведенных стадийным способом, разница в затратах на ремонт нивелируется. При этом, необходимо прогнозно выявлять поведение (работу) используемых дорожных материалов в покрытии.

Опыт строительства и эксплуатации дорог свидетельствует, что при малой и средней интенсивности движения стадийное строительство оправдано и в экономическом, и в энергетическом плане. Однако, при значительных транспортных нагрузках оно значительно уступает альтернативному, прежде всего в энергетическом отношении.

4.2.4. Энергопотребление ремонта и содержания дорог

Неверный выбор в качестве функции цели единовременных затрат при строительстве дороги может привести к малой долговечности дороги и к неоправданному перерасходу энергоресурсов в последующей эксплуатации. Поэтому необходимо использовать комбинированную функцию цели, куда входят энергозатраты на ремонт. Объем ремонтных работ в ходе эксплуатации дороги, как выше указывалось, достигает до $6 \cdot 10^1$ % начальных вложений. Необходимо учитывать и такие факторы, как безопасность участников движения, условия жизни населения вблизи магистралей.

Важнейшим фактором затрат на ремонт вообще и связанные с ним энергозатраты в частности, является своевременность проведения необходимых ремонтных работ. Двухлетняя задержка ремонта связана с необходимостью увеличения толщины слоя до $5 \cdot 10^1$ %. Состояние дороги является определяющим при выборе типа ремонта и, следовательно, величины энергозатрат. Усредненные данные энергоемкости обслуживания и ремонта автомобильных дорог приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Потребности энергоресурсов при обслуживании и ремонте автомобильных дорог

Вид работ	Потребность в энергии				Общая площадь обработки, %
	МДж/м ² обрабатываемой площади	МДж/м ² в расчете на один сантиметр слоя	МДж/км дороги	МДж/м ²	
1	2	3	4	5	6
Покрытие из эмульсионно-минеральной смеси					
- частичная ширина	1,325	-	$2,42 \cdot 10^3$	0,662	50

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6
- полная ширина	0,593	-	$2,16 \cdot 10^3$	0,593	100
Щебеночное покрытие					
- частичная ширина	5,65	-	3,078	0,845	15
- полная ширина	4,98	-	$18,2 \cdot 10^3$	4,984	100
Заплаты на поверхности (механизированный метод, $h = 10\text{см}$)	37,6	14,8	$13,8 \cdot 10^3$	3,773	10
Вскрытие и ремонт					
- ручной метод, $h = 10\text{см}$	224,6	22,09	$16,4 \cdot 10^3$	4,492	2
- механизированный метод, $h = 21\text{см}$	235,9	15,47	$43,1 \cdot 10^3$	11,8	5
Покрытие шламом	1,69	-	$6,16 \cdot 10^3$	1,691	100
Покрытие асфальтобетоном, $h = 5\text{см}$	72,94	14,33	$266,9 \cdot 10^3$	72,9	100

4.2.5. Энергопотребление производственных предприятий по выпуску основных дорожно-строительных материалов

Приготовление материалов, необходимых для создания дороги, связано с энергозатратами соответствующих производственных предприятий, рис.4.1. Значения энтальпий и энергозатрат ряда дорожных материалов приведены в таблице 4.4. Очевидно расхождение приведенных результатов друг с другом и с тем, что дается в иных источниках.

В отношении продуктов комплексных производств, в данном случае это, прежде всего, битум подобное расхождение вполне объяснимо. Распределение общих затрат комплексного производства между несколькими продуктами представляет задачу, которая до сих пор не имеет однозначного решения. В этой связи, в случае с

битумом имеет место самое различное распределение энергозатрат между продуктами перегонки нефти.

В отношении других материалов ситуация объясняется применением различных технологий или изменением состава, например, в отношении цемента возможна «мокрая» и «сухая» технологии производства, а также разнообразие марок, вариация минералогического состава и пр.

В отношении энтальпии, например, асфальтобетона, необходимы сведения об использованной методике расчета, прежде всего о выборе постоянной интегрирования при расчете внутренней энергии.

Данные таблицы 4.4 со всей очевидностью показывают высказанную ранее условность оценки теплотехнологических процессов с помощью удельных затрат энергии, прежде всего для различных предприятий пусть и выпускающих одинаковую продукцию. Удельные энергозатраты наиболее пригодны для отслеживания динамики процесса изменения ситуации с энергопотреблением в той или иной системе материальных или энергетических превращений.

Среди производственных предприятий дорожной отрасли наиболее энергоемкими являются асфальтобетонные заводы. Затраты энергии на тонну асфальтобетонной смеси колеблются от 8 до 13 килограмм условного топлива. Многие определяет исходная влажность минеральных заполнителей: изменение ее на 1% изменяет расход топлива примерно на $1 \cdot 10^1$ %. Однако, немало связано со сложившимся подходом к организации технологического процесса в целом и проведения отдельных операций, в частности. Многие можно изменить за счет изменения концепций положенных в основу конструкции теплотехнологических агрегатов, концепций их использования.

Многое говорилось о введении в структуру оборудования АБЗ изотермических емкостей для накопления готовой АБС или полуфабрикатов АБС. Их применение повышает равномерность работы теплотехнологических подсистем и, кроме прочих положительных моментов, приводит к снижению расхода топлива до $1 \cdot 10^1$ %.

Не меньший эффект можно получить при отказе от автономной работы огне-технических установок параллельно работающим технологическим линиям. Например, дымовые газы из сушильно-нагревательного барабана имеют достаточное количество кислорода для использования их в качестве окислителя в другом, располо-

Таблица 4.4

Удельные энергозатраты производства и энтальпия дорожных материалов, МДж/т

Материал	Беларусь	Чехия	Франция	США	Институт асфальта (США)
Цемент	$3,4 \cdot 10^3 - 4,7 \cdot 10^3$ *	$4,2 \cdot 10^3 - 8,3 \cdot 10^3$	$3,77 \cdot 10^3 - 5,07 \cdot 10^3$	$7,72 \cdot 10^3 - 8,98 \cdot 10^3$	$7,33 \cdot 10^3 - 8,47 \cdot 10^3$
Известь	$3,6 \cdot 10^3$ *	$4 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$4,65 \cdot 10^3 - 9,88 \cdot 10^3$	$8,33 \cdot 10^3$
Битум	$4 \cdot 10^3$	$21 \cdot 10^3 - 45 \cdot 10^3$	$40,48 \cdot 10^3$	-	310-620
Сталь	$11,3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3$ *	$23 \cdot 10^3 - 47 \cdot 10^3$	$25,14 \cdot 10^3$	$27,9 \cdot 10^3 - 34,89 \cdot 10^3$	$22,16 \cdot 10^3$
Гудрон	-	-	$27,57 \cdot 10^3$	-	-
Дробленые каменные материалы	-	-	58,6	67,5	73,9
Рыхлые материалы (гравий песок)	-	-	29,3	17,4	16,0
Дробленый гравий	-	-	-	46,5	42,2
Дробленый шлак	-	-	104,7	104,7	-
Песчано-гравийные смеси					
необработанные	-	-	134,1	-	-
обработанные					
- битумом	-	$3,495 \cdot 10^3 - 2,456 \cdot 10^3$ (404)*	492,3	-	-
- шлаком	-	-	251,4	-	-
- цементом	-	479-507	356,1	-	-
- известью и пуццоланом	-	-	347,8	-	-
Асфальтобетон	$4,4 \cdot 10^2 - 5,5 \cdot 10^2$ *	$3,32 \cdot 10^3 - 3,34 \cdot 10^3$ (456)*	534,2	680,9 23*	256,6 20,9* 17,5**
Цементобетон	$0,85 \cdot 10^3$ *	$1,04 \cdot 10^3 - 1,06 \cdot 10^3$	754,2	6,4*	7,3*
Тощий бетон	-	-	502,8	-	-
Цементогрунт	-	486-514 7*	-	-	-

* - Удельные энергозатраты процессов приготовления

** - Приготовление в барабанных смесителях

женном недалеко огнетехническом агрегате. Это может быть сушильно-нагревательный барабан параллельной технологической нитки. Особенно выгодна такая системная организация работы технологических линий АБЗ когда кроме традиционных противоточных сушильно-нагревательных барабанов имеются прямоточные. У последних ряд достоинств, которые перечеркивает один негативный момент: высокая температура ($\approx 3 \cdot 10^2$ °С) уходящих газов. Использование этих газов в расположенном на одной площадке обычном противоточном барабане (например, АБЗ «Шарковщина») весьма существенно (до $2 \cdot 10^1$ %) снизит суммарные затраты топлива. Список подобных примеров можно продолжить, он индивидуален, как правило, для каждого АБЗ и являет собой одну из сторон рационального построения теплоэнергетической системы промышленного предприятия. Изменение ситуации с энергообеспечением теплотехнологических процессов позволит по иному оценить многие производства.

Вместе с тем, энергосбережение процесс комплексный, затрагивающий многие стадии технологии, подчас далекие от тепловой обработки. Так, например, от неправильного хранения нефтепродуктов, особенно светлых, потери могут составлять до $1 \cdot 10^1$ %. Емкости должны быть окрашены в светлый цвет, находиться в тени и максимально заполнены. Роль величины заполнения видна из следующих данных: при заполнении резервуара на $9 \cdot 10^1$ % потери от испарения составляют 0,3%, при заполнении резервуара на $2 \cdot 10^1$ % эти потери возрастают до 9%.

Важно блокировать все пути увлажнения минеральных материалов и обводнения битума. Это и планировка территории с целью отведения ливневых вод и пр. Сегодня общепризнанна недопустимость открытых битумохранилищ, которые ранее доминировали, уходят в прошлое подземные хранилища. Представляется, что пришла пора крытого хранения минеральных материалов, стимулирования поставок их меньшей влажности.

Снижение температуры АБС на 10°С приводит к снижению расхода энергии на $\approx 7\%$. Введение ПАВ (поверхностно активных веществ) в состав АБС позволяет снизить температуру выпускаемой смеси (температуру операции) в среднем на $2 \cdot 10^1$ °С.

Совершенствование конструкции дорожной одежды с использованием различных органических вяжущих, использование маловязких битумов, вспененных битумов (снижение энергозатрат на 25%), чернение щебня для поверхностной обработки дорожных покрытий (экономится 4 кг у.т. на тонне щебня), наконец, применение битумных эмульсий (экономится 8 кг у.т. на тонне), полная автоматизация всего процесса на современной элементной базе – важнейшие энергосберегающие технологические изменения в дорожном строительстве. Об этих энергосберегающих технологиях хорошо известно специалистам дорожной отрасли. Как показывает практика, абсолютно мало изменений отмечается в организации энергообеспечения теплотехнологического процесса, которая стала ахиллесовой пятой производства. Улучшению этой стороны проблемы энергосбережения в основном и посвящено данное пособие.

5. Повышение эффективности использования энергии в теплотехнологических системах

5.1. Общие сведения

Характерными чертами материального производства, как уже отмечалось, является его энергорасточительность и весьма низкий уровень общего реализуемого энергосберегающего эффекта, несоизмеримый с уровнем потенциального резерва энергосбережения, многократно уступающий уровню общего прироста энергопотребления. Попытаемся понять причину последнего.

Энергетику страны можно представить в виде системы, структурную схему которой можно представить в варианте рис.5.1. На первых трех составляющих ее под-



Рис.5.1. Принципиальная структурная схема энергетики материального производства

системах привлекаются к работе специалисты энергетики. В частности, к третьей подсистеме относится служба главного энергетика промышленного предприятия. Для этих подсистем в совокупности коэффициент преобразования энергии не опус-

кается ниже 25%. Четвертая подсистема, в большинстве, случаев теплотехнологическая, что вытекает из структуры энергопотребления промышленного производства. Не рассматривая причин отметим, что обслуживается она, как правило, специалистами, не имеющими отношения к энергетике. Коэффициент использования первичной энергии здесь крайне редко превышает 10%, опускаясь в ряде случаев ниже 2%. Традиционный подход к энергообеспечению теплотехнологических процессов отличается дискретностью энергетического анализа в узких границах отдельных теплотехнологических агрегатов и в рамках частных мероприятий, что абсолютно недостаточно для достижения уровня эффективного использования энергии. Предпосылкой радикального сдвига в изменении ситуации с энергообеспечением теплотехнологий в системах преобразования вещества является внедрение методологии системного подхода к обеспечению теплотехнологических производств и комплексном проведении соответствующих мероприятий, не относящихся порой напрямую к теплотехнологическому оборудованию. Например, разработка генерального плана завода обеспечивающая минимальное перемещение сырья, обустройство складов, транспортеров в плане блокирования путей увлажнения последнего и т.д. Крупномасштабное энергосбережение возможно лишь в рамках отраслевого технологического комплекса на основе рационального построения его структуры.

Энергетически рациональное построение теплотехнологической системы предприятия, в первую очередь, учитывает требования второго закона термодинамики. Общий анализ таких систем показывает, что в наборе оборудования, образующего систему, наряду с теплотехнологическими агрегатами, характерными для данной технологии, дополнительно появляются устройства с общими функциями, независимыми от специфики технологий. Введение таких дополнительных подсистем в структуру теплотехнологической системы предприятия обеспечивает рациональность ее построения и повышает эффективность энергоиспользования. Поскольку производственные предприятия дорожной отрасли используют теплотехнологии, коренное изменение дел с их энергообеспечением лежит на пути реструктуризации. В этой связи представляется необходимым ознакомление с такими подсистемами, что и является задачей данного раздела.

5.2. Использование тепловых насосов

Понятие трансформации теплоты применяется к процессам, в ходе которых повышается температурный уровень хотя бы одного теплового потока системы. Система, осуществляющая указанный процесс, называется тепловым насосом.

Тепловой насос или теплонасосная установка (ТНУ) – устройство непрерывного действия, получающее энергию в форме теплоты и в форме работы, которая затем передается окружению в форме теплоты, при этом температура теплоотдатчика ниже температуры теплоприемника (рис. 5.2). Принцип ТНУ предложен в 1852 году лордом Кельвином. В тепловом насосе теплота передается от более холодного теплоотдатчика к более нагретому телу - теплоприемнику, и подобный переход теплоты, согласно второму закону термодинамики, требует затрат энергии из вне. На схеме упомянутые затраты энергии изображены в виде работы $L_{ц}$.

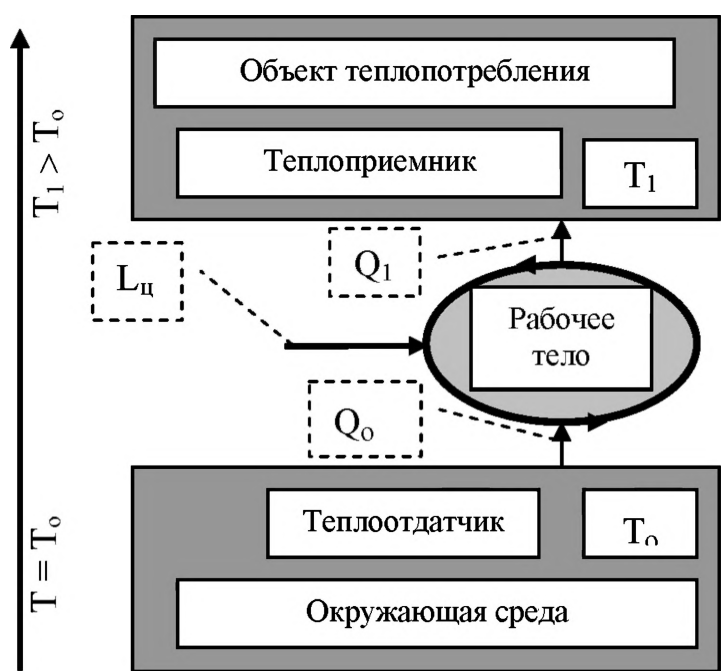


Рис.5.2. Принципиальная схема отопительного теплового насоса: T_0 , T_1 – соответственно температура окружающей среды и теплоприемника; $L_{ц}$ – работа цикла, затрачиваемая на обеспечение функционирования теплового насоса; Q_0 , Q_1 – соответственно теплота подводимая и отводимая от теплового насоса.

Тепловые насосы, в зависимости от источников теплоты (теплоотдатчик и теплоприемник), можно разделить на два класса: отопительные и утилизацонные. Первые применяются для отопления за счет энергии окружающей среды, имеющей температуру (T_{oc}) более низкую, чем температура внутри отапливаемого помещения ($T_{внут.}$). Вторые применяются для повышения температурного уровня сбрасываемых тепловых потоков, имеющих температуру (T_{yx}) более высокую, чем T_{oc} , но недостаточную для использования в технологических целях. Тепловой насос повышает температурный уровень потока теплоты до некоторого значения ($T_{техн.}$),

при котором этот поток пригоден для использования в технологическом процессе.

Основное назначение всех промышленных ТНУ – использование сбросной теплоты для теплоснабжения технологических процессов. Сбрасываемые тепловые потоки имеют широкий диапазон температур, но в количественном отношении доминируют те, прямое использование которых крайне затруднено. На рис. 5.3 показана структура распределения сбросных потоков теплоты, характерная для промышленных регионов. Для ТНУ потенциальными источниками энергии являются потоки с температурой до 100°С. Несложно видеть, что это 50% всего энергопотребления системы промышленного региона. При более высоких температурах целесообразно использовать другие способы утилизации теплоты, без тепловых насосов. В частности, использование регенераторов и рекуператоров, рекомпрессии пара с помощью пароструйных компрессоров. ТНУ применяются лишь тогда, когда температурный уровень сбросного потока теплоты не позволяет использование его в других процессах.

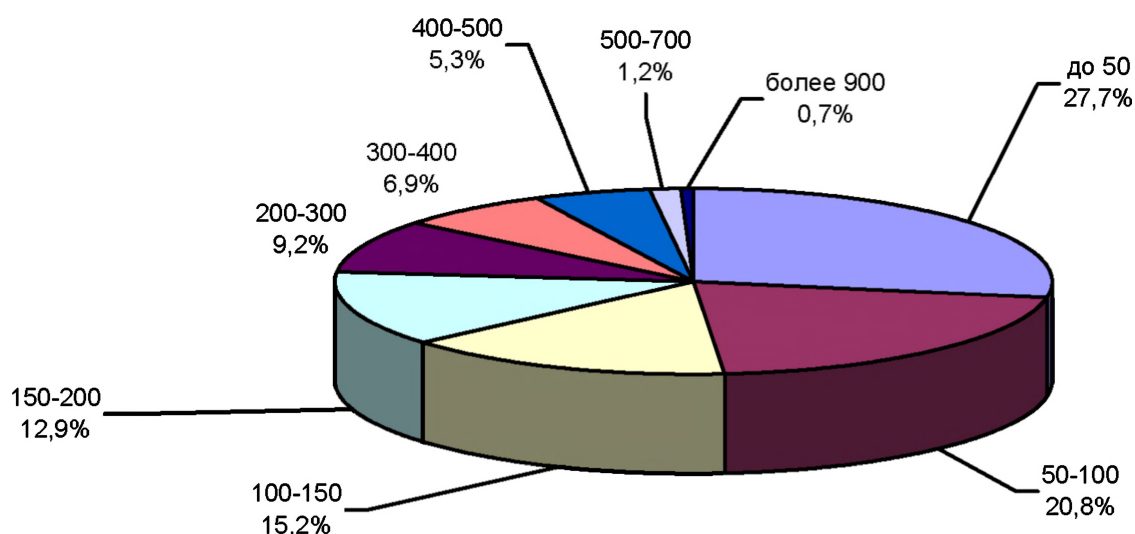


Рис.5.3. Распределение сбросных тепловых потоков по температурам для промышленного района (температура потоков указана в градусах Цельсия)

Полезным эффектом теплового насоса является теплота q_1 , переданная теплопотребляющему объекту, затратами – работа $l_{ц}$. Для характеристики обратного термодинамического цикла теплового насоса используется отопительный коэффициент (μ), под которым понимается отношение теплоты, сообщенной в обратном термодинамическом цикле нагреваемой системе, к работе, затраченной в этом цикле

$$\mu = q_1/l_{\text{ц}}, \quad (5.2)$$

Из баланса энергии теплового насоса

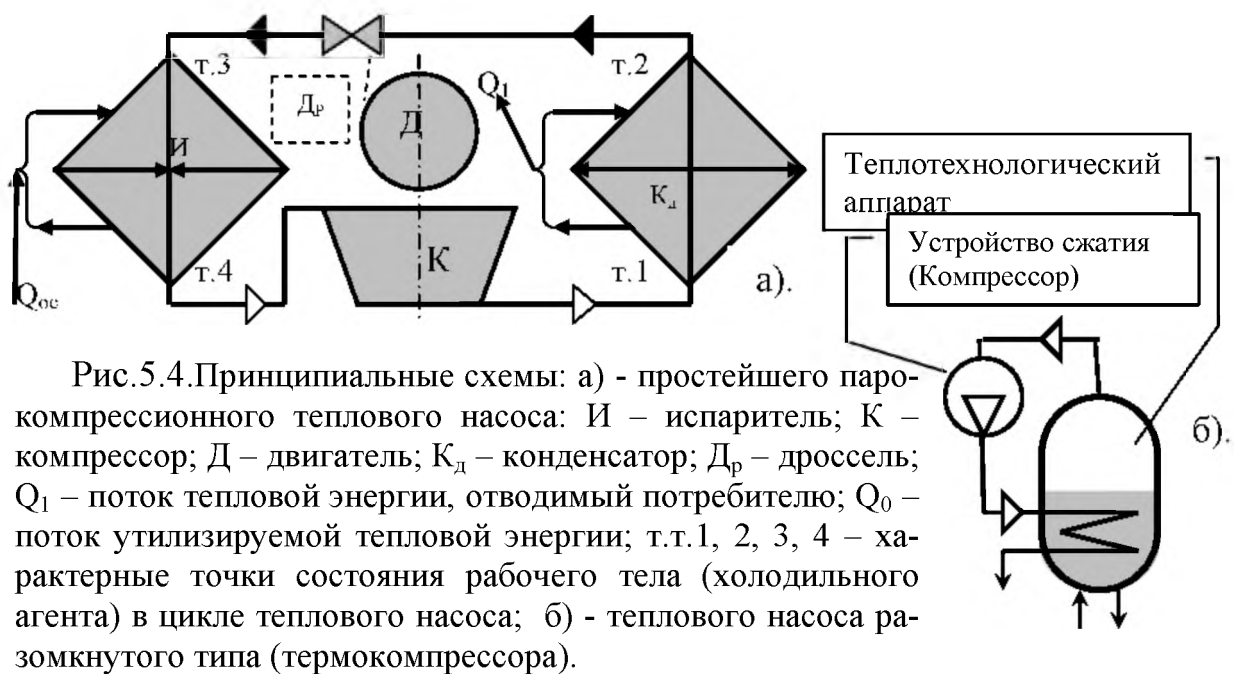
$$q_1 = l_{\text{ц}} + q_0 \quad (5.3)$$

следует $q_1 > l_{\text{ц}}$, что определяет диапазон отопительного коэффициента $1 < \mu < \infty$. Здесь q_0 – теплота, отводимая от окружающей среды. Чем выше значение μ , тем эффективнее ТНУ.

Основная причина, по которой ТНУ не имели широкого применения в мире в течение длительного периода, заключается в сочетании двух неблагоприятных факторов, долгое время господствовавших во всех странах: невероятно (хищнически) дешевые энергоресурсы и относительная сложность механического оборудования. Мощный толчок применению ТНУ был положен нефтяным кризисом 1973 г. Целесообразность использования ТНУ зависит от соотношения цен на топливо и электроэнергию. Экономически эффективными они становятся при отношении цены кВт·ч электроэнергии к цене тонны условного топлива равном $\approx(0,5 - 0,6)$, что представляет соотношение цен джоуля электроэнергии к цене джоуля энергии топлива $4 \div 5$. Особенно эффективна ТНУ там, где между температурами теплоотдатчика и теплоприемника имеет место небольшая разность температур, что встречается весьма часто: сушильные процессы, выпарные процессы, ректификация, отопление и пр. В нашей стране известность в кругах специалистов ТНУ получили после выхода в 1931 году монографии /10/, но, по причине перекоса цен на энергоресурсы, значительного применения они еще не получили. С устранением диспропорции цен топлива и электроэнергии ТНУ открываются широкие горизонты.

ТНУ могут иметь замкнутую и разомкнутую схемы. Разомкнутая схема ТНУ наиболее простая и применяется в тех случаях, когда возможно совместить непосредственно в одном теплотехнологическом агрегате теплоприемник и теплоотдатчик. Такие ТНУ имеют другое название - термокомпрессоры. Рассматриваются термокомпрессоры в следующем разделе. Принципиальные схемы простейших ТНУ обоих типов даны на рис. 5.4. Полный поток энергии, подведенный потребителю от ТНУ, определяется значением отопительного коэффициента.

Рассмотрим энергобаланс системы теплоснабжения, состоящей из тепловой электростанции (ТЭС), линии электропередачи (ЛЭП) и ТНУ с приводом от элек-



тродвигателя, для определения минимального значения отопительного коэффициента ТНУ, при котором затраты первичного энергоресурса при альтернативном теплоснабжении от котельной будут большими, чем при отоплении с помощью ТНУ. На рис. 5.5 приводится вариант энергобаланса. Цифры приведены для двух вариантов затрат условного топлива на выработку киловатт-часа электроэнергии: показателя лучшей конденсационной станции 331 грамм и среднего по энергосистеме страны значения 268 грамм. В этом случае на 100% топлива, сожженного на ТЭС, выраба-

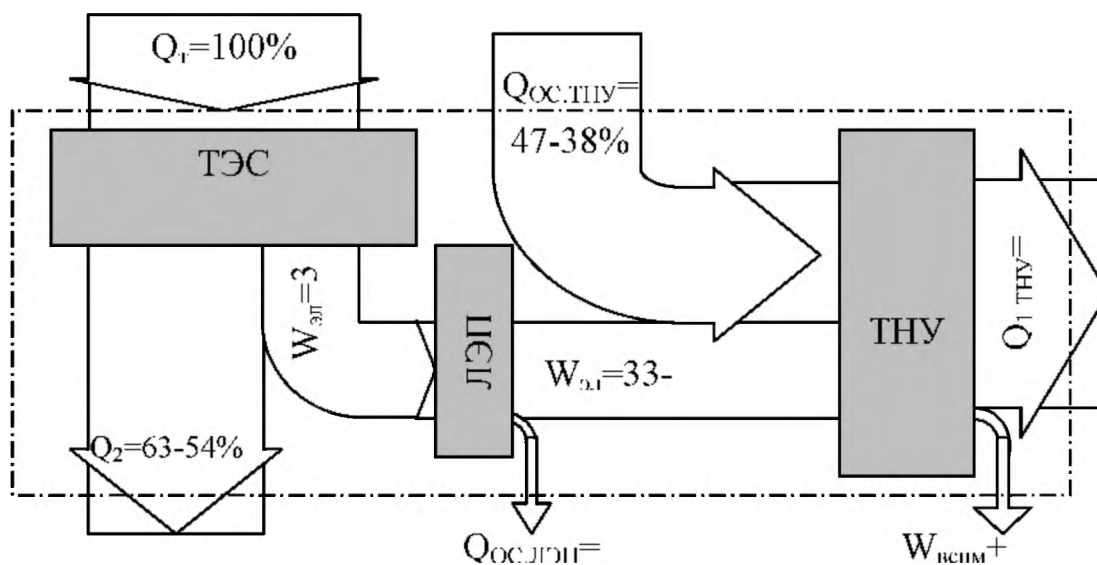


Рис. 5.5. Энергобаланс системы теплоснабжения, состоящей из тепловой электростанции (ТЭС), линии электропередачи (ЛЭП) и ТНУ с приводом от электродвигателя

тывается 37 – 46% электроэнергии. При передаче электроэнергии в электросетях страны теряется около 8-9% ее количества, что, в пересчете на энергию затраченного топлива, составляет 4%. Далее, из 33 – 42% дошедшей до ТНУ энергии первичного энергоресурса, затрачивается на привод вспомогательных механизмов и теряется в электродвигателе до 5%. КПД котельных можно принять 80%. В этом случае, чтобы ТНУ обеспечила потребителя равным с котельной количеством теплоты, необходимо значение ее отопительного коэффициента $\mu \geq (2 \div 2,4)$. Для ТНУ, которые сегодня могут использоваться, поток энергии, подведенный потребителю, оценивается $1,2 \cdot 10^2$ % по отношению к энергии топлива, сожженного на ТЭС для получения электроэнергии, необходимой для работы ТНУ, т.е. их отопительный коэффициент составляет величину $\approx (3 - 4)$. Используя данные диаграммы рис. 5.3 возможно оценить перспективу экономии топлива, требуемого для страны, только на отоплении.

Интересен вопрос типа привода компрессора теплового насоса. С точки зрения простоты эксплуатации, надежности, стоимости непосредственно привода предпочтительным оказывается электропривод. Однако по затратам первичного энергоресурса, ввозимого в страну, он значительно уступает альтернативному решению привода от двигателя внутреннего сгорания (ДВС). На рис. 5.6 показана принципиальная схема ТНУ с приводом от ДВС. Изменение привода сопровождается включением в контур теплоносителя двух теплообменников:

- радиатора двигателя внутреннего сгорания (РДВС) для утилизации теплоты охлаждения непосредственно двигателя;
- охладителя выхлопных газов (ОВГ), образующихся при его работе.

Непосредственно тепловой насос остался прежним, что и в случае с электроприводом. Изменения касаются схемы нагрева теплоносителя. Часть теплоносителя, покинув конденсатор ТНУ, последовательно проходит сначала через радиатор системы охлаждения ДВС, далее через охладитель дымовых газов. Затем происходит смешение его с другой частью теплоносителя, прошедшего только через конденсатор ТНУ, и общий поток по трубопроводу с помощью насоса (Н) направляется потребителю. Последнему передается теплота трех процессов, проходящих параллельно:

- 1) Q_1 - конденсации рабочего тела ТНУ;

- 2) $Q_{\text{сод}}$ – охлаждения двигателя;
- 3) $Q_{\text{одг}}$ – охлаждения дымовых газов.

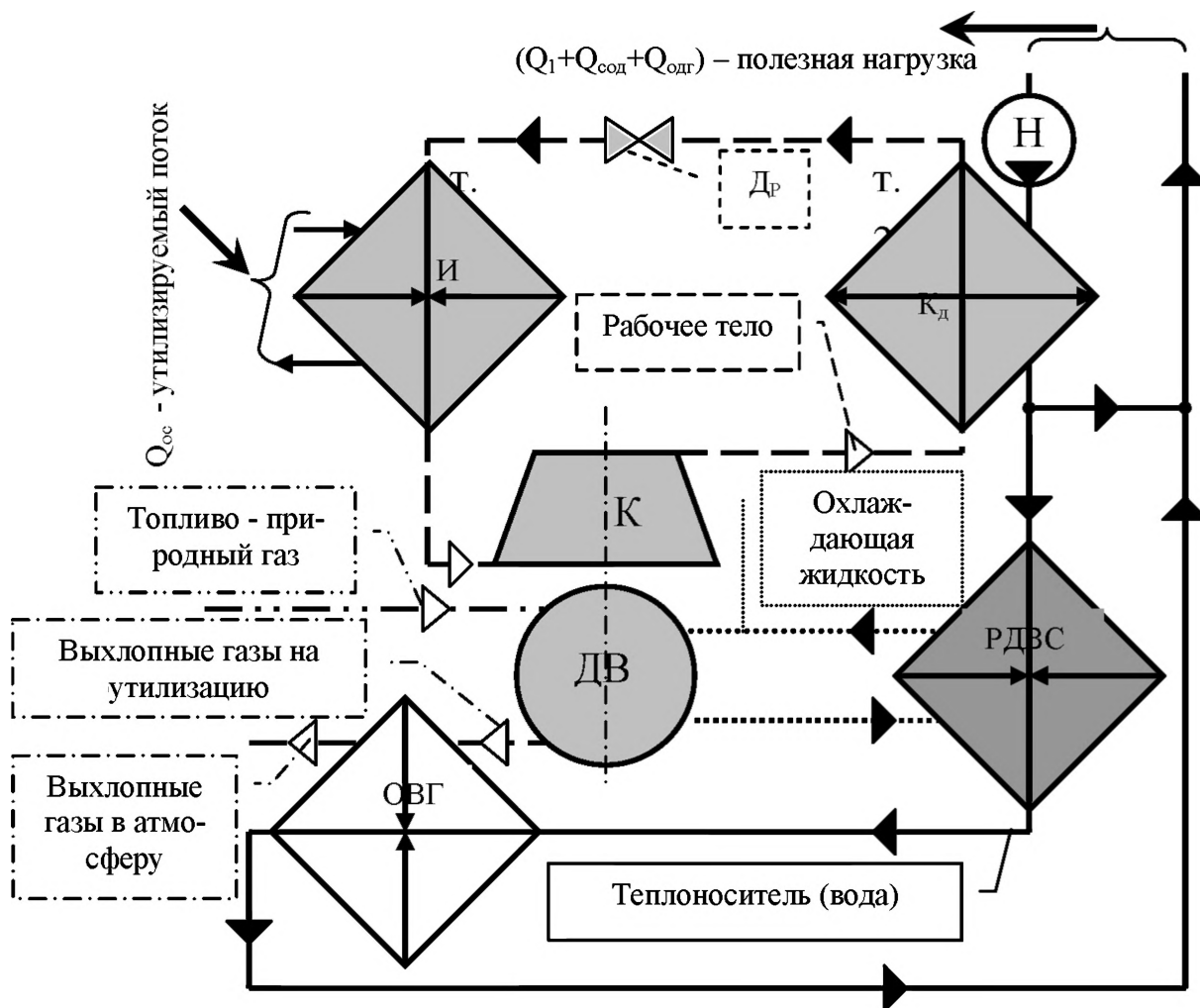


Рис.5.6. Принципиальная схема простейшей парокompрессионной ТНУ с приводом от ДВС: И – испаритель; К – компрессор; К_д – конденсатор; Д_р – дроссель; ДВС – двигатель внутреннего сгорания для привода компрессора; РДВС – радиатор системы охлаждения ДВС; ОВГ – охладитель выхлопных газов; Н – циркуляционный насос; Q_1 , $Q_{\text{сод}}$, $Q_{\text{одг}}$ – соответственно потоки теплоты, отводимые от теплового насоса, системы охлаждения двигателя, охладителя дымовых газов.

На рис. 5.7 дан баланс энергии ТНУ с приводом от ДВС. За 100%, как и в предыдущем случае, принята энергия расходуемого топлива. Непосредственно в двигателе рассеивается 3% энергии первичного энергоресурса. Оставшаяся энергия распределяется примерно так: 25% составляет работа двигателя на привод компрессора ТНУ, 72% передается охлаждающей жидкости и уносится с выхлопными газами. Из системы утилизации энергии дымовых газов и энергии охлаждающей жидкости выбрасывается с уходящими газами и рассеивается 14% общего количества энергии топлива. Поскольку отопительный коэффициент остается прежним ($\mu = 2 \div 2,4$), можно рассчитать, что из окружающей среды поступает 25 – 35% энергии. Затраты

энергии на привод вспомогательных механизмов ТНУ близки 5%, что оставляет для отопления 45 – 55%.

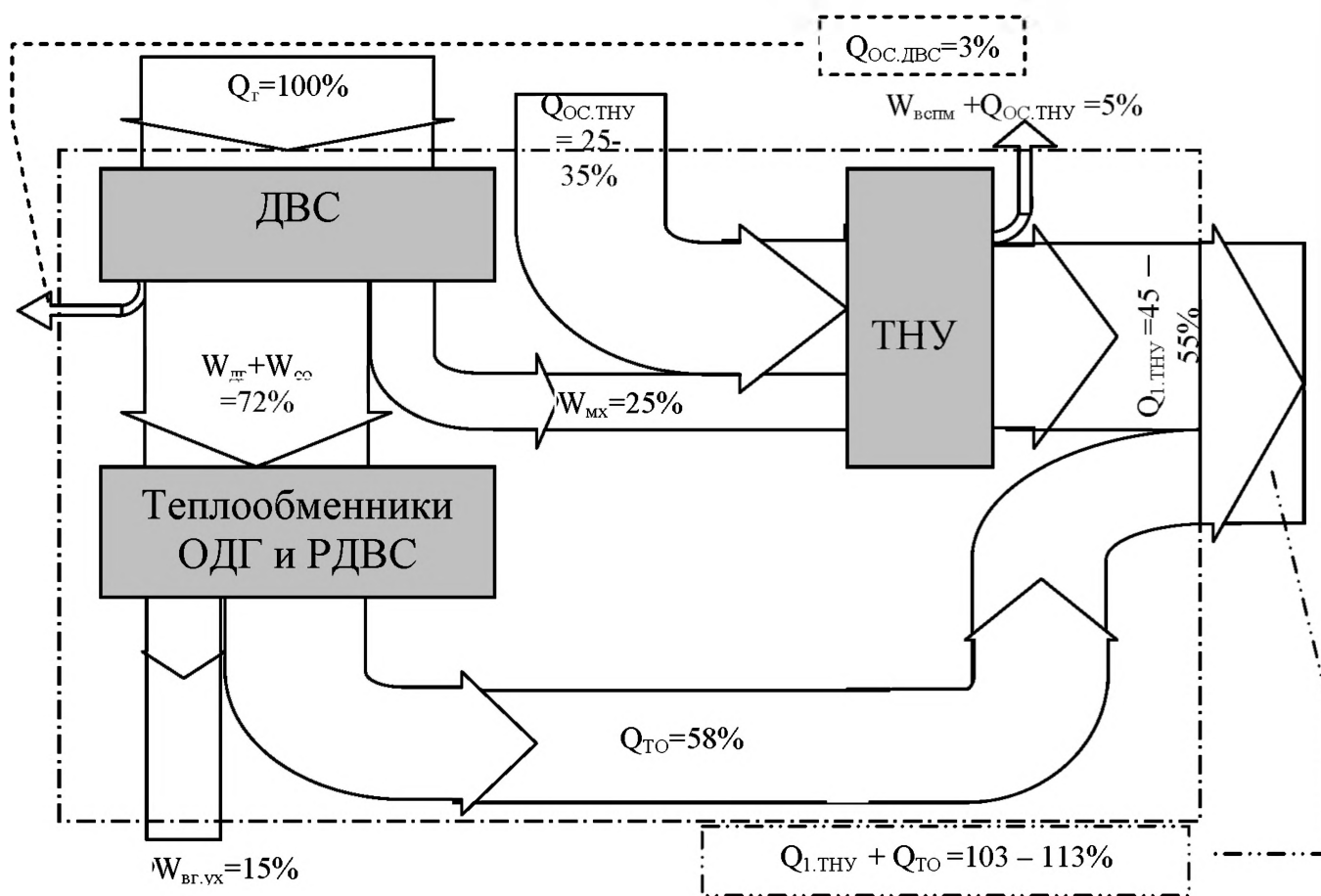


Рис. 5.7. Энергобаланс ТНУ с приводом ДВС: Q_T – теплота реакции горения топлива; $Q_{OC.TNU}$ – тепловая энергия, поступающая в ТНУ из окружающей среды; $Q_{1.TNU}$ – тепловая энергия, передаваемая потребителю от ТНУ; $Q_{ТО}$ – тепловая энергия, передаваемая потребителю от теплообменников систем охлаждения дымовых газов и двигателя; $W_{вспм} + Q_{OC.TNU}$ – рассеяние энергии вспомогательными механизмами и через конструкцию ТНУ в форме теплоты; $Q_{OC.DBC}$ – рассеяние энергии в форме теплоты процесса охлаждения двигателя; $W_{вг.вх}$ – энергия выхлопных газов, сбрасываемых в атмосферу; $W_{др} + W_{со}$ – энергия потоков воды системы охлаждения и дымовых газов, покидающих двигатель; $W_{мх}$ – энергия, передаваемая компрессору ТНУ от двигателя в форме механической работы.

В сумме с 58% энергии системы утилизации получаем, что потребителю теплоты доставляется поток составляющий 103 – 113% энергии первичного топлива. В случае расчетов для реальной ТНУ ($\mu = 3 \div 4$), которую возможно применить на сегодняшний момент, конечный поток возрастает до 138 – 153%, что по расходу топлива в два раза лучше котельной. Полученные показатели сопоставимы с таковыми для теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которые рассматриваются ниже. Но в варианте ТЭЦ имеет место громоздкая и дорогая связь в виде водяных сетей между потребителями и генератором теплоты, в варианте с ТНУ связь более гибкая и простая.

При рассмотрении утилизационных тепловых насосов необходимо отметить осложняющие факторы: место и временные графики сброса и потребления теплоты, мощность сбрасываемых потоков и потребность в них, агрегатное состояние, загрязненность, агрессивность носителей сбрасываемой теплоты и пр. Остро стоит проблема рабочего тела, допускающего работу с температурами более высокими, чем те, что имеют место в варианте отопительной ТНУ. Рациональным решением, в этом случае, может быть сочетание ТНУ с теплообменником. Характерный пример такого сочетания приведен ранее при рассмотрении ТНУ с приводом от ДВС, когда в зоне высоких температур (охлаждение выхлопных газов) нагрев теплоносителя, подогретого уже в конденсаторе ТНУ, осуществляется непосредственно в теплообменнике-охладителе газов.

Эффективность применения ТНУ повышается при их объединении с аккумуляторами теплоты, выравнивающими графики работы ТНУ, о чем речь пойдет ниже.

В заключение отметим, что парокompрессионные ТНУ не являются единственным их типом. Возможны абсорбционные ТНУ, где используется явление сорбции (поглощения) одного вещества объемом другого. Сорбция используется для термохимического процесса сжатия рабочего тела, что позволяет заменить потребление высококачественной энергии первого вида, необходимой для привода механического компрессора, на энергию второго вида, подводимую в форме теплоты сорбционных процессов. Особенно заманчиво применение абсорбционных ТНУ при наличии отработанных потоков теплоты и использовании их в качестве первичного теплоносителя для “привода” ТНУ. Наряду с абсорбционными и компрессионными ТНУ могут быть воздушные, парожетторные и др.

Сегодня не вызывает сомнений, что в долговременной перспективе роль ТНУ будет непрерывно возрастать и они станут неотъемлемым элементом энергосистемы вообще и системы энергоснабжения любого объекта в частности.

5.2. Рекомпрессия пара, использование пароструйных компрессоров

Существует ряд теплотехнологий, которые объединяет наличие отработанного потока пара низкого давления. Сложность использования такого потока связана с

его низким давлением и, как неизбежное следствие этого, низкой температурой конденсации, при которой затруднен поиск потребителя теплоте процесса конденсации пара. Проблему решает рекомпрессия (повышение давления пара), поскольку позволяет пар снова использовать в технологическом процессе. Принципиальная схема осуществления рекомпрессии представлена на рис.5.4-б. Установки рекомпрессии относят к ТНУ, при этом, очевидна относительная простота соответствующей принципиальной схемы. Вместе с тем, как это часто случается, в процессе внедрения приходится сталкиваться со скрытыми проблемами, решение которых усложняет схему рекомпрессии. Следует отметить следующее:

- 1) прежде всего, необходимо совпадение графиков генерации и потребления ресурса, что, чаще всего, не соблюдается;
- 2) территориальная удаленность источника и потребителя пара недопустима, поскольку транспортировка пара, по ряду причин, на значительные расстояния нежелательна;
- 3) утилизируемый поток пара должен быть свободным от загрязнений и достаточно сухим;
- 4) чаще всего приходится иметь дело с водяным паром, который в своей обыденности обладает уникальными свойствами, и не всегда привлекательными для технического применения. В конкретном случае, следует отметить два момента: крутой ход кривой упругости воды и чрезвычайно пологий ход пограничной кривой пара. Резкое изменение давления насыщения (крутой ход кривой упругости воды) приводит к тому, что в большинстве случаев начальное давление рекомпрессии водяного пара оказывается ниже атмосферного давления, т.е. имеет место вакуум. Последний существенно осложняет установку, поскольку требуются мероприятия по удалению воздуха, попадающего в поток из атмосферы через неплотности конструкции. Пологий ход пограничной кривой пара связан с чрезвычайно большими значениями удельного объема пара воды и такими же размерами сечений для пропуска пара, что требует колоссальных размеров устройств сжатия. Нелинейное возрастание потерь трения с ростом размеров установки делает невозможным применение традиционных механических компрессоров.

Один лишь перечень трудностей применения рекомпрессии объясняет ограниченность ее применения в прошлом подходе к структуре теплотехнологических систем. Изменение ситуации с ценой топлива приводит к необходимости реструктуризации оборудования, связанного с энергоиспользованием при проведении технологических процессов. Несовпадение графиков генерации и потребления имеет более глобальный характер в системе эффективного энергоиспользования и решается с помощью теплового аккумулирования энергии, о чем речь пойдет в следующем параграфе. Загрязненность пара вынуждает переходить на использование ТНУ закрытых схем, рассмотренных ранее. Остановимся на вопросах влажности и низкого давления утилизируемого пара.

Поток влажного пара представляет механическую смесь насыщенной жидкости и насыщенного пара. Последние имеют плотности, которые для воды отличаются в десятки тысяч раз. Такое положение обеспечивает крайнюю неоднородность потока влажного пара по своей структуре, сопровождаемую термодинамическим несовершенством (увеличением необратимых потерь) протекающих процессов и, что еще существеннее, невозможностью согласования скоростей столь разнородных потоков насыщенных пара и жидкости со скоростями движущихся частей устройств сжатия. В совокупности с другими факторами рассогласование скоростей жидкости и движущихся частей компрессора приводит к поломке последних. Наиболее подходят для рекомпрессии влажного пара роторные винтовые компрессоры, состоящие из двух находящихся в зацеплении винтов, имеющих сложные профили.

Между зубьями винтов образуются полости, которые заполнены сжимаемым веществом. При вращении винтов полости перемещаются в сторону нагнетания, перемещая заключенное в них вещество, что и обеспечивает сжатие последнего. Возможность сжатия влажного пара обусловлено следующими свойствами роторного компрессора:

- низкая скорость и плавность потока вдоль роторов;
- возможность достижения больших степеней сжатия в одной ступени;
- стабильно высокое значение КПД в большом диапазоне нагрузки.

Однако, при пониженном давлении пара и сколь-нибудь значительных массовых расходах утилизируемого потока пара механические устройства сжатия оказы-

ваются неприменимыми. Требуется использование принципиально иных устройств сжатия, предназначенных для работы с чрезвычайно большими объемными расходами. К таковым относятся струйные аппараты, получившие широкое распространение во многих отраслях техники. Их отличает простота конструкции и сжатие потока без непосредственной затраты механической энергии. Принципиальная схема струйного аппарата показана на рис.5.8. Основные элементы аппарата: сопло, камера смешения, диффузор. Он работает следующим образом. На один килограмм смешанного потока, покидающего установку, поступает g килограмм рабочего потока давлением p_1 и $(1-g)$ килограмм сжимаемого потока давлением p_2 . Рабочий поток поступает в сопло струйного аппарата, где он ускоряется. В ходе расширения до

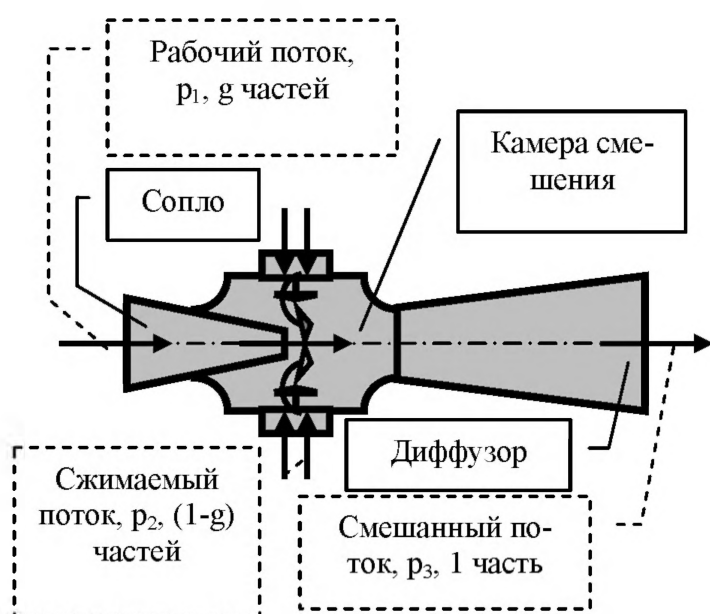


Рис.5.8. Принципиальная схема струйного аппарата

давления p_2 , его потенциальная энергия превращается в кинетическую и на выходе сопла рабочий поток имеет скорость ω_1 . Сжимаемый поток инжектируется рабочим потоком в камеру смешения струйного аппарата и, в итоге, смешивается с последним. Здесь происходит выравнивание скоростей обоих потоков, сопровождающееся перераспределением кинетической энергии между ними. Далее единый поток поступает в диффузор, где происходит его торможение, вызы-

вающее рост давления потока до величины p_3 ($p_1 > p_3 > p_2$). Кинетическая энергия потока перешла в потенциальную энергию.

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии является основным, принципиальным качеством струйных аппаратов. Оно же позволяет сжимать сильно разреженные среды, когда любые другие устройства бессильны. Кроме того, простота схем включения струйных аппаратов в различные системы, простота обслуживания и несложность изготовления конструкции обеспечивают широкую область использования их в технике.

В литературе струйные аппараты можно встретить под самыми различными названиями: инжекторы, эжекторы, компрессоры, элеваторы, насосы и пр. С изменением агрегатного состояния взаимодействующих сред, изменяются происходящие при этом взаимодействия процессы, что должно отражаться в классификации струйных аппаратов. С этих позиций все струйные аппараты разделяют на группы:

- 1) аппараты, в которых агрегатное состояние обоих сред одинаково. Это газо-(паро-) струйные компрессоры, эжекторы, инжекторы и насосы;
- 2) аппараты, в которых агрегатное состояние обоих сред различно и не изменяется в процессе прохождения струйного аппарата. Это водо-воздушные эжекторы, струйные аппараты для пневмо- и гидротранспорта сыпучих материалов;
- 3) аппараты, в которых агрегатное состояние обоих сред различно, но изменяется в процессе прохождения струйного аппарата так, что на выходе имеет место однофазный поток. Это струйные подогреватели и парожидкостные инжекторы. В первых рабочей средой является жидкость, а инжектируемой – пар, во вторых – рабочая среда является паром, инжектируемая – жидкостью.

Очевидно, что классификация струйных аппаратов и их применение выходит за рамки данного раздела и всей книги, тем не менее, приведем ее полностью. Для грамотного специалиста будет полезным изначально иметь представление о возможностях этих устройств.

Классификация струйных аппаратов производится и на основании других признаков, прежде всего, по степени понижения давления рабочей среды (p_1/p_2) и степени повышения давления инжектируемой среды (p_3/p_2). По изложенному признаку струйные аппараты с однофазными обоими потоками делятся на три группы:

- 1) струйные компрессоры, используемые для повышения давления пара или газа. Оба потока находятся в газообразном (паровом) состоянии. Степень понижения давления рабочей среды (p_1/p_2) велика, степень повышения давления инжектируемой среды (p_3/p_2) умеренна ($1,2 < p_3/p_2 < 2,5$);
- 2) эжекторы, используемые для поддержания глубокого вакуума. Оба потока находятся в газообразном (паровом) состоянии. Степень понижения давле-

ния рабочей среды (p_1/p_2) и степень повышения давления инжектируемой среды (p_3/p_2) велики, ($2,5 < p_3/p_2$);

- 3) инжекторы, где оба потока находятся в газообразном (паровом) состоянии. Степень понижения давления рабочей среды (p_1/p_2) значительна, степень повышения давления инжектируемой среды (p_3/p_2) мала ($p_3/p_2 < 1,2$). Это горелки огнетехнических устройств, дутьевые и обдувочные устройства и пр.

Струйные аппараты с разнофазными потоками по тому же признаку делят:

- 1) пневмотранспортные струйные аппараты, когда рабочая среда упругая (сжимаема), а подсасываемая – неупругая (твердое, сыпучее тело или жидкость). При этом, если инжектируется жидкость, то такие инжекторы называют струйными насосами;
- 2) жидкостно-газовые (водо-воздушные) эжекторы, где рабочая среда неупругая (жидкость), инжектируемая – упругая;
- 3) аппараты гидротранспорта сыпучих сред, где обе среды неупругие.

5.3. Аккумуляция энергии

Аккумуляция энергии применяется для преодоления несоответствия графиков генерирования, передачи и потребления энергии, что наблюдается в работе большинства энергоиспользующих систем. В зависимости от типа несоответствия аккумуляция применяется для решения задач:

- 1) снятия пиковой нагрузки, когда несоответствие связано с временным смещением графиков. В этом случае, аккумуляция оказывается дешевле пиковой энергоустановки и, если не снимает, то существенно упрощает обозначенную проблему;
- 2) снижения затрат на первичный энергоресурс, когда требуется накапливать энергию, вырабатываемую в периоды с низкой его стоимостью. Например, при использовании электроэнергии в часы ночных провалов нагрузки цена последней снижается примерно в три раза в сравнении с ценой в часы максимумов нагрузки;

- 3) выравнивания графика выдачи энергоресурса потребителю, когда имеет место периодическое изменение его выпуска. В этом случае необходимо частью максимума генерации энергоресурса заполнить периоды провалов его производства. При небольших градиентах изменения мощности потоков аккумулярование решает данную проблему;
- 4) обеспечения резерва в случае внезапного прекращения работы установок. Ряд первичных энергоисточников подвержена случайным или периодическим колебаниям мощности. Это ветро-, гидро-, солнечные энергоустановки, а также резервные энергоустановки;
- 5) решения проблемы транспорта энергоресурса в часы пиков его передачи по распределительной сети.

Аккумулярование может быть тепловым, электрохимическим, механическим. В системе теплоснабжения энергия аккумулируется в форме внутренней энергии теплоносителя. В системе снабжения топливом или сжатой технологической средой аккумулярование сводится к закачке носителя в искусственные или природные объемы, где он находится при повышенном давлении. В системе электроснабжения возможно непосредственное аккумулярование электроэнергии с помощью конденсаторов, электрохимических и электромагнитных аккумуляторов. Кроме того, возможно аккумулярование в форме внутренней энергии теплоносителя, то ли за счет повышения его температуры, то ли за счет повышения его давления. Возможно аккумулярование механической энергии в кинетической или потенциальной формах. Аккумулярование может быть осуществлено в различных частях системы энергоснабжения: у энергогенерирующей установки, в системе распределения или непосредственно у потребителя (рис. 5.9).

В системе теплоснабжения аккумулятор может быть расположен непосредственно у установки преобразования химической энергии топлива во внутреннюю

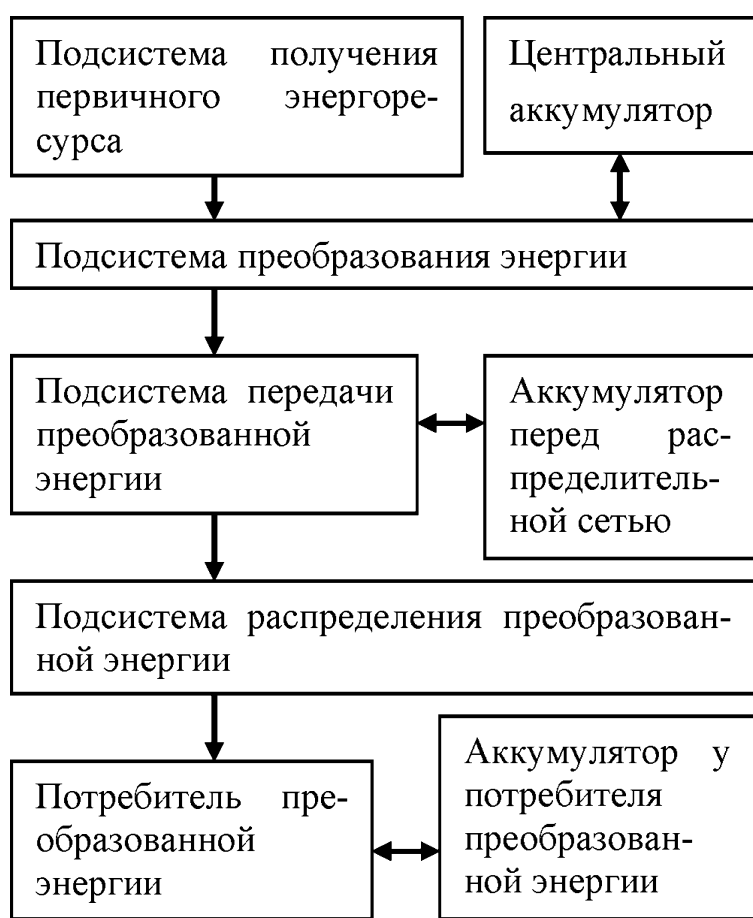


Рис.5.9. Использование аккумуляции энергии в системах энергоснабжения

энергию теплоносителя. Теплотрасса, по которой теплоноситель транспортируется к потребителю, сама по себе является аккумулятором энергии большой емкости. При этом, не исключается аккумуляция перед распределительной сетью и в самих подсистемах теплопотребления.

При выборе аккумуляторных установок учитываются как сугубо экономические факторы, так и эксплуатационные достоинства: маневренность, удобство эксплуатации, емкость, мощность потоков зарядки - разрядки и пр. Емкость аккумулятора определяет затраты на фундамент, изоляцию, выбор аккумулирующей среды. Мощ-

ность потоков зарядки и разрядки аккумулятора определяет диаметр трубопроводов, оборудование, регулирующие эти процессы, мощности компрессора и двигателя.

Изложенное наиболее просто можно показать на примере системы энергоснабжения с одним преобразованием энергии, к которой относится бойлер, обеспечивающий потребителя горячей водой. Для системы горячего водоснабжения типичны большие колебания нагрузки, связанные с ритмом жизни населения: от минимальной ($N_{\text{мин}}$) до максимальной ($N_{\text{макс}}$). Аккумуляция здесь позволяет снять пиковую нагрузку. В отсутствие аккумулятора расчетная пропускная способность подводящей сети и мощность бойлера ($N_{\text{б.расч}}$) должна соответствовать максимальному потреблению горячей воды. При наличии аккумулятора (рис.5.10) расчетная мощность бойлера и сети будет тем ниже, чем больше емкость аккумулятора Q и мощ-

ность потока разряда (N_p). Сравнение затрат на реализацию различных комбинаций наборов параметров является задачей оптимизации системы.

Тепловое аккумулирование энергии известно с XIX века, когда оно успешно

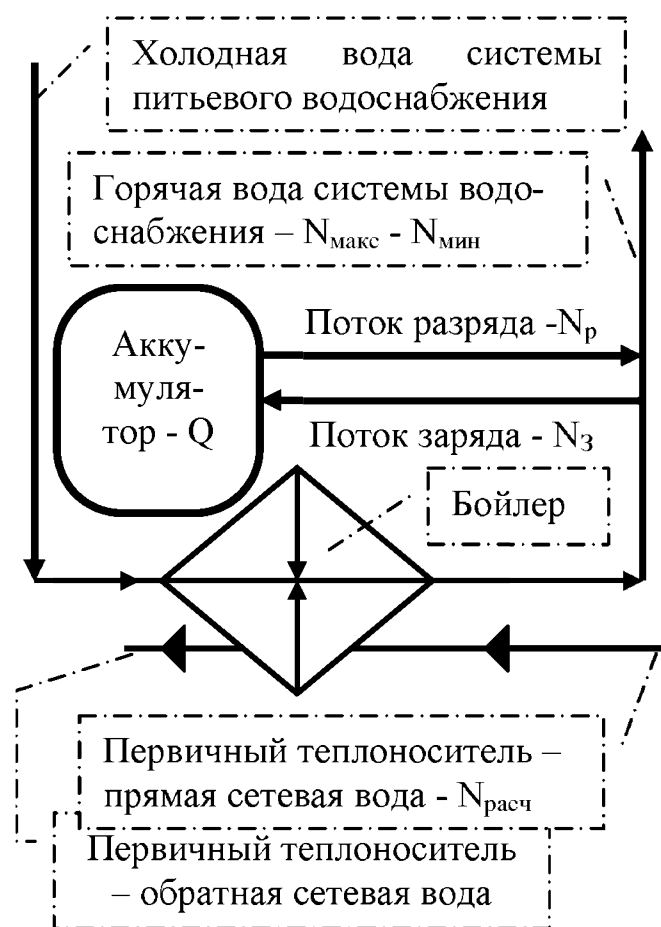


Рис.5.10. Система теплоснабжения с бойлером и аккумулятором тепла

применялось на транспорте, в металлургической и стекольной отраслях промышленности. Тепловое аккумулирование – физические или химические процессы, посредством которых происходит накопление энергии аккумулирующей среды. Тепловой аккумулятор состоит из резервуара для хранения аккумулирующей среды, устройств для заряда и разряда, вспомогательного оборудования.

В настоящее время интерес к тепловому аккумулированию возродился в связи с необходимостью экономии энергоресурсов. Установки теплоснабжения на возобновляемых источ-

никах энергии всегда нуждаются в тепловых аккумуляторах для создания резерва и использования энергии в нужное время. Обычные отопительные котельные и теплонасосные установки нуждаются в аккумуляторах в подавляющем большинстве. Замена с помощью аккумуляторов пиковых мощностей на обычном топливе обеспечивает лучшее использование энергетического оборудования. Современные технологии изготовления аккумуляторов из предварительно напряженного чугуна и использования подземных пустот открывает новые возможности теплового аккумулирования.

Тепловое аккумулирование базируется на изменении удельной внутренней и потенциальной энергии аккумулирующей среды, а также на изменении ее массы. Аккумулирующие среды могут быть твердые, жидкие, газообразной, наконец, двухфазной (влажный пар, когда в процессе аккумуляции используется теплота фазового

перехода). В соответствии с этим построена классификация тепловых аккумуляторов. Если аккумулирующая среда одновременно является теплообменной средой, то имеет место прямое аккумулирование. При косвенном аккумулировании энергия подводится к аккумулирующей среде в процессе массообмена со специальной средой (сорбция веществ) либо в процессе теплопередачи через стенку. Кроме того, различают аккумуляторы постоянной или переменной массы аккумулирующей среды, постоянного или переменного давления аккумулирующей среды, постоянного или переменного объема аккумулирующей среды.

Сфера применения тепловых аккумуляторов энергии велика, что делает целесообразным рассмотрение конкретных схем в специализированных по отраслям соответствующих разделах пособия.

5.4. Энерготехнологическое комбинирование

Энерготехнологическое комбинирование предусматривает создание таких теплотехнологических систем, где энергетическое обеспечение технологического процесса сопровождается минимальным потреблением внешнего первичного энергоресурса и воздействием на окружающую среду. Взаимосвязанность этих двух условий очевидна. В отличие от использования вторичных энергоресурсов, при котором имеет место простое соединение огнетехнических установок с дополнительным оборудованием, энерготехнология предусматривает реструктуризацию теплотехнологического оборудования в сочетании с пересмотром сложившихся технологических потоков и установившихся их параметров при сохранении или повышении качества продукции. В энерготехнологии материальные превращения и их энергетическое обеспечение получают равный статус: технологическая часть работает в режиме, обеспечивающем лучшие показатели энергетической части, последняя, в свою очередь, функционирует в режиме улучшения показателей технологической части. Технологические и энергетические элементы системы неотделимы и только при их совместной работе возможна надежность, энергоэкономичность, наибольшая производительность. При этом характер и масштаб производства определяют специфику энергоиспользования как проектируемых, так и действующих систем.

Наиболее известный и яркий пример энерготехнологии родился в СССР в 30-е годы XX века, когда была предложена и осуществлена интеграция производства электроэнергии и тепловой энергии. Соответствующая энерготехнологическая система получила название теплоэлектроцентрали, а само комбинированное производство электроэнергии и тепловой энергии названо теплофикацией.

Для дальнейшего понимания комплекса вопросов, связанных с энерготехнологией, рассмотрим более подробно сущность теплофикации. Несмотря на все мероприятия, направленные на усовершенствование паросиловых установок (ПСУ) реальных тепловых электростанций, экономичность ПСУ не может быть выше величины, определяемой термическим КПД цикла Карно для интервала температур рабочего тела, используемого в их работе. При максимальной температуре рабочего тела ПСУ $t_1 = 565 \text{ }^\circ\text{C}$ и минимальной температуре рабочего тела, равной температуре окружающей среды ($t_2 = t_0$), можно определить термический КПД цикла Карно: $\approx 6 \cdot 10^1\%$. В циклах реальных установок КПД составляет еще меньшую величину: $\approx 4 \cdot 10^1\%$.

Таким образом, при существующих условиях преобразования теплоты в работу на обычных тепловых электростанциях, около половины первичной энергии должно быть передано холодному источнику. В результате не только повышается стоимость преобразованной энергии, но и загрязняется тепловыми сбросами окружающая среда, выступающая в роли теплоприемника. Поскольку уменьшить тепловые выбросы ПСУ на сегодняшний день проблематично, в условиях дефицита топлива необходимо искать пути их использования.

Для реализации цикла теплового двигателя не имеет значения куда передается теплота Q_2 . Важен лишь сам факт и температурный уровень (T_2) передачи. Проблема утилизации огромных тепловых выбросов (на производство электроэнергии затрачивается около четверти топлива, потребляемого в стране) в цикле ПСУ состоит в том, что для повышения экономичности T_2 не должно превышать $\approx 30^\circ\text{C}$. Такой низкий температурный потенциал потока теплоты осложняет поиск потребителей для него, поскольку, как правило, требуется более высокий температурный уровень, порядка $\approx 1 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$. (Около половины всего топлива страны расходуется на покрытие

нужд потребителей, для которых требуется поток теплоты именно при температурах до $\approx 1 \cdot 10^2$ °С).

В этих условиях и было предложено поднять температуру T_2 в цикле ПСУ до такого уровня, который обеспечивает теплоте Q_2 многочисленных потребителей. Термический КПД цикла ПСУ при этом снижается и на получение того же количества электроэнергии сжигается больше топлива, но коэффициент использования топлива возрастает практически до единицы, поскольку теплота Q_2 полезно используется на коммунальные и технологические нужды, а не просто выбрасывается в окружающую среду.

Такие тепловые электростанции, как ранее отмечалось, получили название теплоэлектроцентралей. Паровые турбины, используемые на ТЭЦ называются теплофикационными. При раздельном производстве электроэнергии на конденсационной тепловой станции (КЭС) и теплоты в котельной в тех же количествах, что и на ТЭЦ, расход топлива оказывается существенно большим, чем в комбинированном варианте совместного производства. Таким образом, теплофикация является важнейшим

способом экономии топлива, признанный всем мировым сообществом.

На рис 5.11 представлена принципиальная схема простейшей теплофикационной установки. Котлоагрегат (КА) совместно с пароперегревателем (ПП) производит пар. Далее рабочее тело ($t.1$) поступает в паровую турбину (ПТ), где расширяется до давления p_2 , совершая полезную работу, расходуемую на привод электрического генератора (Г). Затем поток пара направляется к тепловому потребителю (ТП) и последнему передается теплота процесса конденсации пара (Q_2). Полученный конденсат ($t.3$) возвращается на станцию и насосом (Н) его давление повышается до начального ($t.4$), после чего рабо-

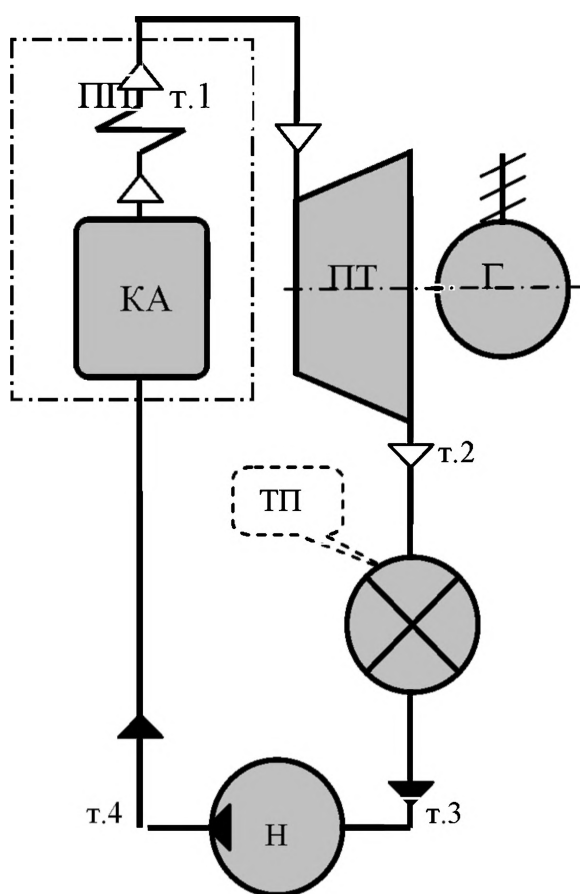
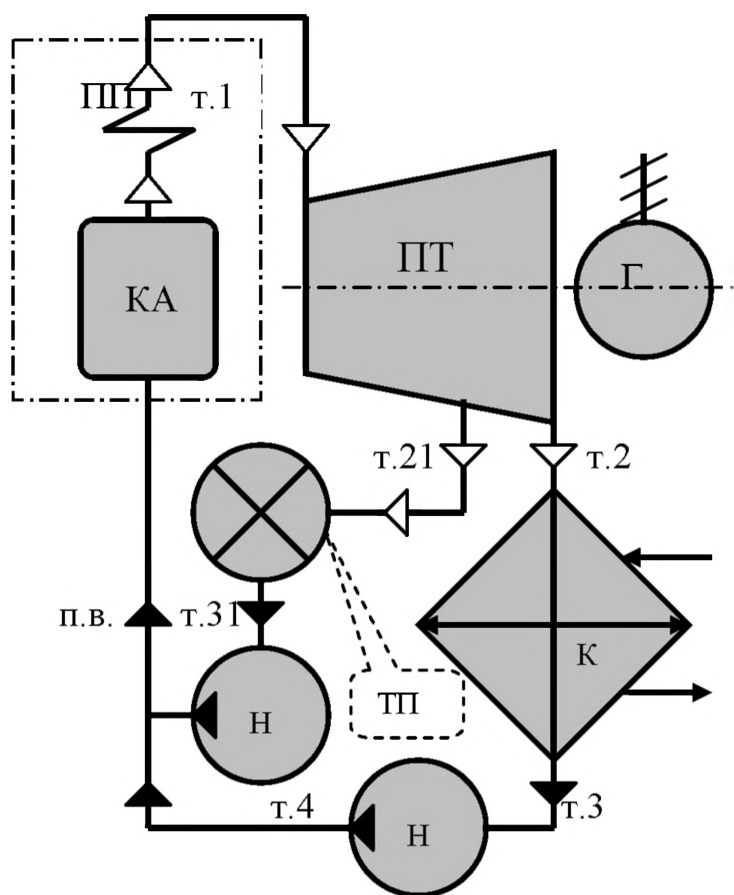


Рис.5.11. Принципиальная схема простейшей ТЭЦ с противодавлением

чее тело поступает в КА. Данную схему отличает в части параметров рабочего тела – повышенное давление за турбиной, в части составных агрегатов и устройств – отсутствие конденсатора, функции которого выполняет тепловой потребитель (ТП), удаленный от ТЭЦ. Из последнего обстоятельства вытекает негативный момент в использовании теплофикации: при применении крупных ТЭЦ возникают дополнительные затраты, связанные с транспортом теплоносителя от ТЭЦ к потребителю теплоты и обратно. В правильном выборе этих затрат (мощности ТЭЦ) во многом кроется успех или неуспех теплофикации в конкретных условиях.

В рассмотренной выше теплофикационной установке весь паровой поток из турбины направляется к теплому потребителю, поэтому $Q_{\text{тп}} = Q_2$. Такая ТЭЦ называется ТЭЦ с противодавлением, а паровые турбины – турбинами с противодавлением (тип Р). Для противодавленческих ТЭЦ коэффициент использования топлива максимален и близок к единице. Недостатком ТЭЦ с противодавлением является выработка электроэнергии по графику, определяемому потреблением теплоты. Перерыв теплоснабжения означает перерыв производства теплоты.

На рис.5.12 представлена принципиальная схема ТЭЦ свободной от последнего



недостатка предыдущей схемы теплоэлектроцентрали с противодавлением. В ней используются турбины с теплофикационными отборами пара. Часть пара расширяется до промежуточного давления (т.21) и направляется теплому потребителю для передачи теплоты процесса конденсации. Оставшаяся часть расширяется до минимального давления (т.2), направляясь затем в конденсатор (К). Из конденсатора и от теплового потребителя, в конечном итоге, рабочее тело насосами возвращается в котлоагрегат.

Рис.5.12. Принципиальная схема простейшей ТЭЦ с отборами

В зависимости от требований потребителя отборы могут иметь различное давление пара. Обычно используются отборы двух типов: теплофикационные для нужд отопления и промышленные для массовых технологических потребителей. В зависимости от сочетания типов отборов различают:

- турбины типа П, из отборов которых пар идет на технологические нужды;
- турбины типа Т – дающие пар на отопление;
- турбины типа ПТ, имеющие отборы обоих типов.

Соотношение между количествами пара, поступающего в отборы и в конденсатор, могут изменяться в определенных пределах, что повышает гибкость установки в отношении режимов. Такие ТЭЦ получили наибольшее распространение, хотя коэффициент использования топлива у них меньше предыдущих противоаварийных.

5.4.1. Микро-ТЭЦ

ТЭЦ получили за последние 50 лет достаточно широкое распространение в нашей стране, что достаточно для выявления как сильных, так и слабых сторон такого сложного энерготехнологического образования. К слабым сторонам крупных ТЭЦ относятся громоздкие тепловые сети, крайне дорогостоящие, достаточно ненадежные и трудоемкие в ремонте. Обозначенная проблема имеет два диаметрально противоположных решения:

- дальнейшее увеличения капитальных вложений до уровня, обеспечивающего высокую и безусловную надежность тепловых сетей;
- устранение тепловых сетей как таковых, что возможно при снижении теплогенерирующих мощностей до уровней, при которых производство энергии связано с потреблением только распределительными тепловыми сетями.

Естественно, в масштабах страны нельзя отдавать доминирующего предпочтения одному какому-либо варианту, да еще в условиях развитой системы теплоснабжения на базе крупных ТЭЦ. Решение должно приниматься дифференцированно для каждого случая и на базе технико-экономических проработок. В целом по стране

одно решение должно дополнять другое. Остановимся на относительно менее известном, втором решении проблемы тепловых сетей.

Переход к миниатюризации теплофикационного принципа энергоснабжения стал возможным благодаря двум факторам. Во-первых, увеличению добычи газообразного топлива и росту его доли в структуре приходной части энергобаланса большинства стран. Природный газ позволяет использовать принципиально иные технологии использования энергии топлива, качественно отличающиеся с термодинамических позиций, прежде всего, от твердотопливных технологий. Во-вторых, произошел качественный прорыв в производстве продукции ряда областей промышленности (двигателестроения, электромашиностроения, электроники и др.), выразившийся в повышении ее надежности при снижении стоимости. Стали возможными полное автоматизированное управление всем технологическим процессом и эксплуатация с периодическим обслуживанием, что позволяет широко внедрять автономные теплофикационные установки малой мощности для энергообеспечения отдельных малых и средних потребителей. Такое решение достаточно хорошо апробировано в ряде стран. Например, Дания, расположенная в климатической зоне весьма схожей с нашей, имеет самое низкое энергопотребление и на душу населения, и на единицу общего национального продукта, чем обязана, в значительной степени, весьма широкому внедрению описанного варианта теплофикации. Подобные установки комбинированного тепло- электроснабжения, в зависимости от мощности называемые (скорее, как дань традиции) мини- и микро- ТЭЦ (МТЭЦ), получают самое широкое распространение как в системах отопления, так и в технологических системах. При этом, количественное изменение мощности приводит к качественному изменению составляющих подсистем ТЭЦ.

В самом общем виде принципиальная схема МТЭЦ представлена на рис. 5.13. В качестве энергетической установки, производящей работу, используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС). При этом, если мощность ДВС менее 1 МВт, как правило, используется газодизельный двигатель и речь можно вести в целом о микро-ТЭЦ. При больших мощностях ДВС используется газотурбинный вариант установки (ГТУ), и всю систему можно считать мини-ТЭЦ. Таким образом, в МТЭЦ вместо паросиловой установки используется газовый двигатель, который, при малых мощ-

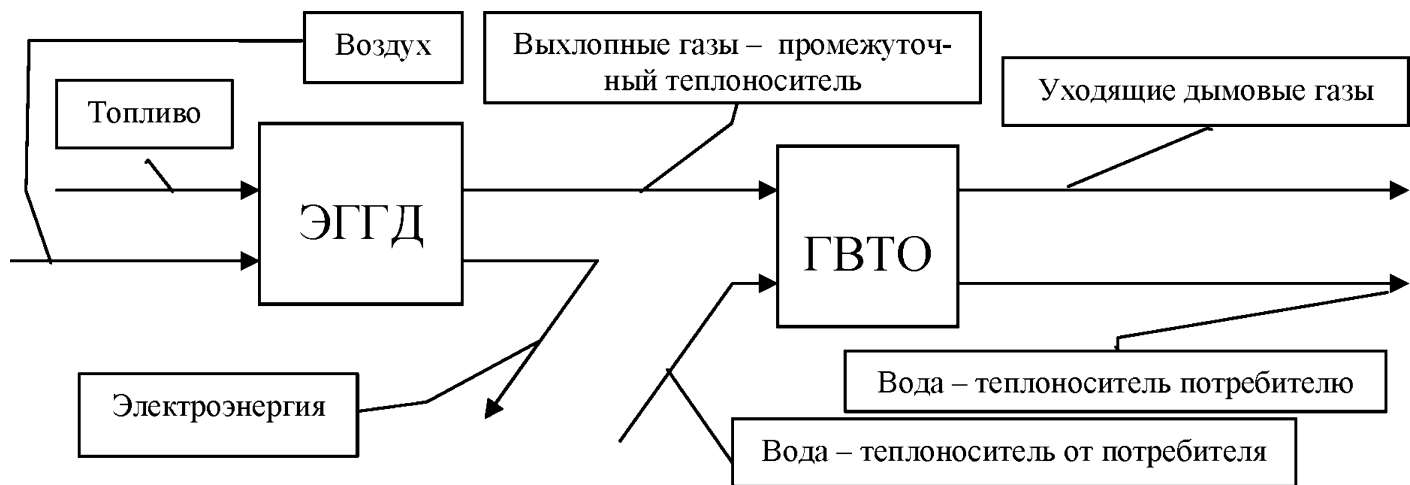


Рис. 5.13. Принципиальная схема простейшей теплофикационной мини-установки: ЭГГД – электрогенератор с газовым двигателем внутреннего сгорания; ГВТО – газо-водяной теплообменник

ностями, обладает рядом эксплуатационных преимуществ, например, маневренен. Максимальная температура рабочего тела ДВС ($T_{\text{макс}}$) значительно выше температуры рабочего тела паросиловых установок. Если в лучших паротурбинных блоках температура пара достигает 565°C , то в газовых двигателях она, в зависимости от ряда причин, лежит в диапазоне $1100 - 1500^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает снижение эксергетических потерь при трансформации химической энергии топлива во внутреннюю энергию продуктов реакции окисления топлива. Температура дымовых газов на выходе из ДВС ($T_{\text{кон}}$) колеблется на уровне $(3 - 5) \cdot 10^2^{\circ}\text{C}$, т.е. является достаточно высокой и это признано недостатком ДВС, снижающим его КПД. Объединение ДВС в комбинации с теплогенерирующим устройством (на схеме рис.5.12 таковым является газо-водяной теплообменник), превращает данный недостаток в достоинство, поскольку отработанное рабочее тело (выхлопные газы) используются в качестве источника энергии для нагрева теплоносителя. Температура газов после теплообменника опускается до значений $\approx 1,4 \cdot 10^2^{\circ}\text{C}$, что соответствует температуре уходящих газов котлоагрегата. В итоге, на МТЭЦ имеют место предпосылки для того, чтобы ее термодинамическая эффективность превышала таковую обычной теплоэлектростанции. Схема реальной МТЭЦ, безусловно, усложняется с тем, чтобы получить те или иные преимущества.

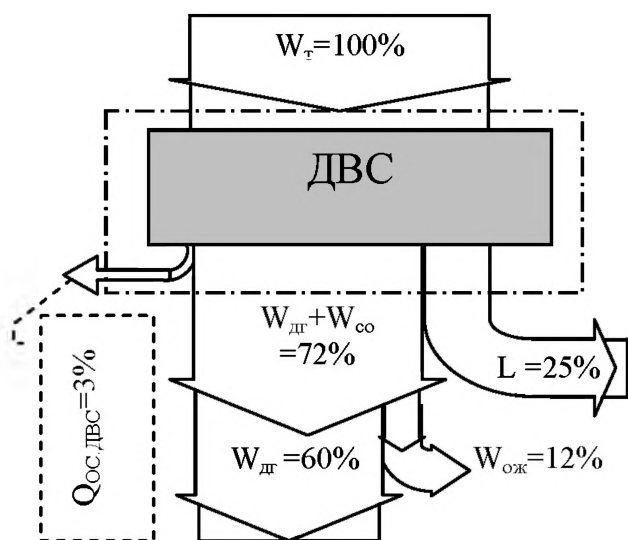


Рис.5.14. Энергобаланс поршневого ДВС

Рассмотрим баланс энергии поршневого ДВС, рис.5.14. Из 100% энергии топлива (W_T) в работу (L) превращается около 25%, 3% ($Q_{ос.ДВС}$) рассеивается в окружающую среду непосредственно двигателем, 12% отводится ($W_{ож}$) с охлаждающей жидкостью, остальные ($W_{др}$) 60% рассеиваются с выхлопными газами. Последние два потока энергии наиболее просто использовать в схеме МТЭЦ подобно тому, как это сделано на примере теплонасос-

ной установки с приводом от газового двигателя.

Принципиальная схема МТЭЦ, в этом случае, изображена на рис.5.15. Дизель-

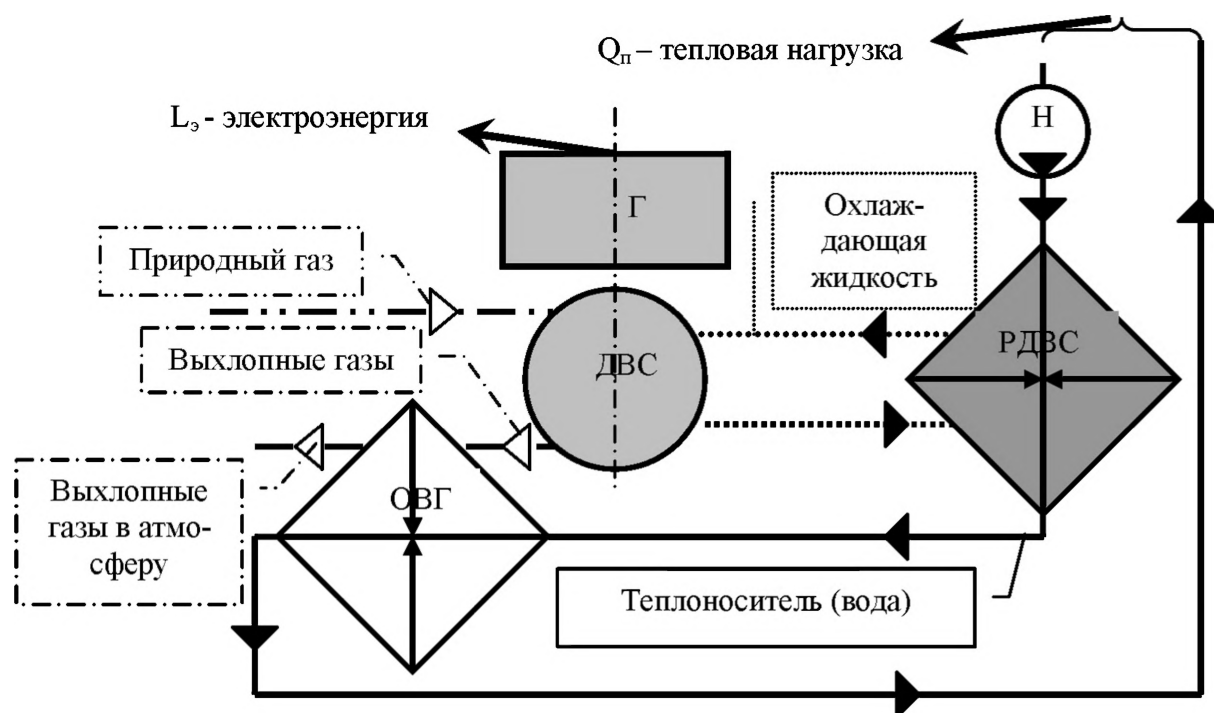


Рис.5.15. Принципиальная схема простейшей МТЭЦ

ный двигатель (Д) с помощью электрогенератора (Г) вырабатывает поток электроэнергии ($L_э$). Одновременно, в ходе его работы, с помощью системы теплообменников нагревается теплоноситель (вода), передающая тепловую нагрузку (Q_n) потребителю. Процесс нагрева теплоносителя осуществляется сначала за счет энергии охлаждающей жидкости в радиаторе двигателя (РДВС), далее за счет энергии выхлопных газов в теплообменнике (ОВГ). Циркуляция теплоносителя обеспечивается насосом (Н). Баланс энергии представлен полосовой диаграммой, рис.5.16.

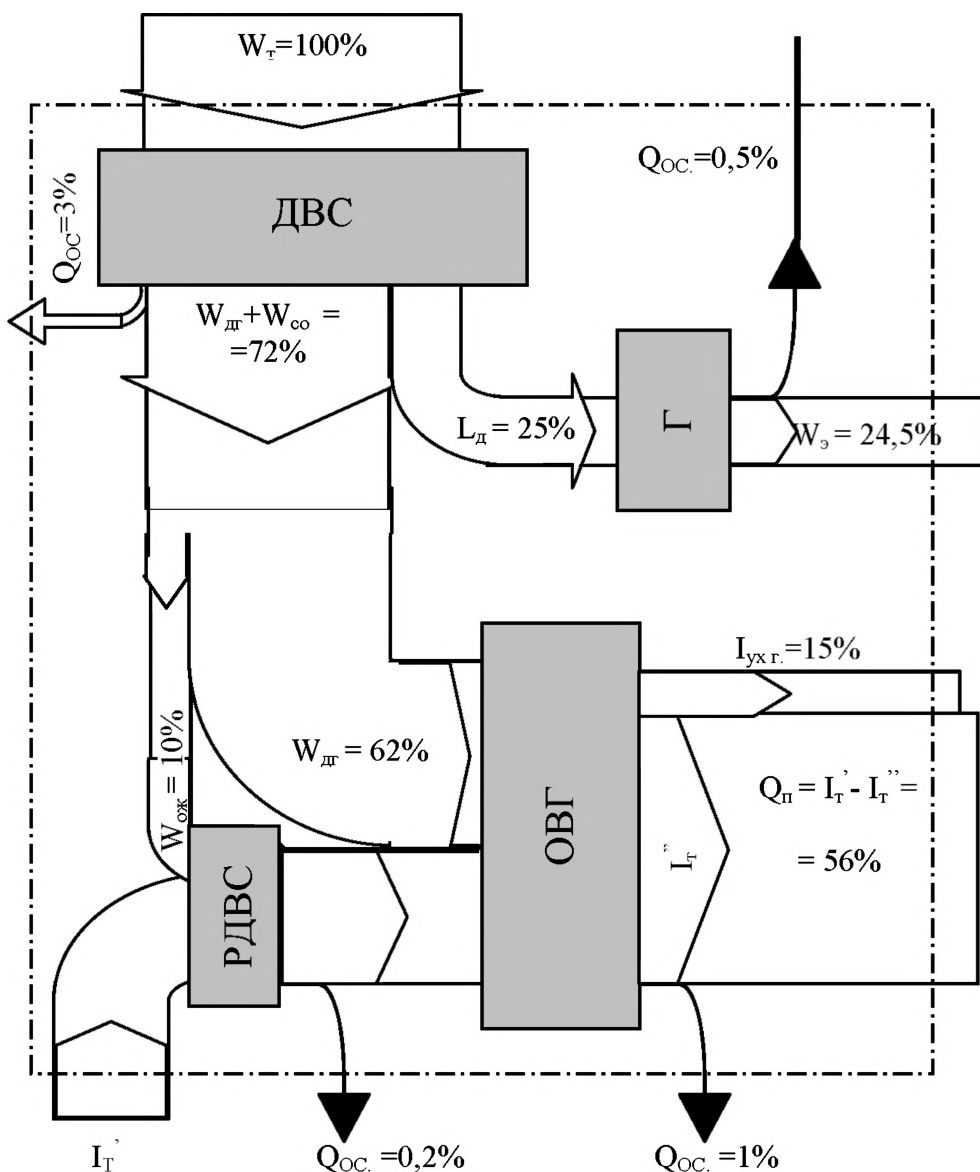
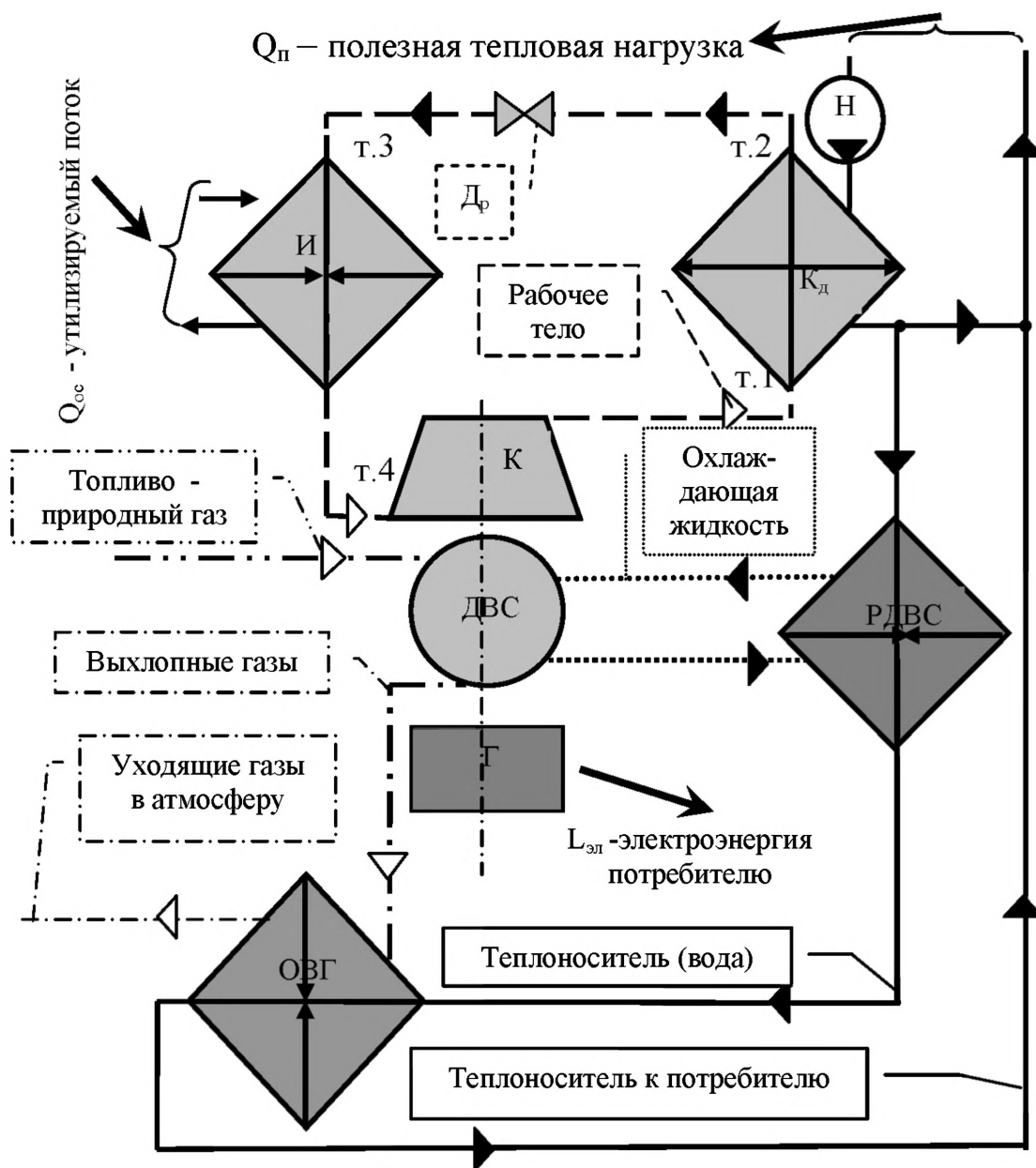


Рис. 5.16. Энергобаланс МТЭЦ: W_T – энергия топлива; L_d – работа ДВС; $W_э$ – электроэнергия потребителю; $Q_п$ – тепловая нагрузка потребителю; $I_т'$, $I_т''$ – соответственно энтальпия входного и выходного потока теплоносителя; $I_{ух.г}$ – энтальпия уходящих газов; $W_{др}$, $W_{со}$ – соответственно энергия выхлопных газов и охлаждающей жидкости, покидающих ДВС; $Q_{ос}$ – рассеяние энергии в форме теплоты в окружающую среду.

Коэффициент использования топлива для рассматриваемого варианта составляет величину, близкую к 80%, что одинаково с величиной данной характеристики котельной, но треть полезной энергии, трансформируемой на МТЭЦ для дальнейшего потребления, составляет электроэнергия. Котельная потребителю предлагает лишь тепловую форму энергоиспользования. Ценность последней, как энергии второй группы, несоизмеримо ниже. Указанное отличие котельной и ТЭЦ устанавливает эксергетический КПД_е системы. Для отопительной котельной он оценивается $1 \cdot 10^{-1}\%$, для вышеприведенного варианта потоков МТЭЦ его величина составляет $3 \cdot 10^{-1}\%$. Из чего следует, что приведенный вариант МТЭЦ в три раза превышает по термодинамической эффективности отопительную котельную.

Естественно и полезно дальнейшее объединение МТЭЦ с ТНУ, для чего в схеме теплонасосной установки необходимо установить газовый двигатель, производящий работу в большем количестве, чем требуется для привода компрессора ТНУ (рис.5.17). Баланс энергии в этом случае изменяется, поскольку становится иной



пропорция между потоком энергии ДВС, отпускаемой потребителю в виде электроэнергии, и потоком энергии используемой непосредственно в схеме установки на привод компрессора ТНУ. На рис.5.18 приведены два варианта энергобаланса: один соответствует схеме с отпуском электроэнергии стороннему потребителю в размере 20%, другой (количественная характеристика потоков энергии для него приведена в скобках) – схеме, где эта величина составляет 5%.

Рис.5.17. Принципиальная схема простейшей МТЭЦ соединенная с парокompрессионной ТНУ

За 100% в обоих случаях принята энергия топлива. И в данном случае более эффективно используется первичный энергоноситель при большем количестве электроэнергии, отпускаемой внешнему потребителю:

- в первом варианте эксергетический КПД_ε равен $3 \cdot 10^{-1}\%$, при количестве энергии, отданной потребителям 94% энергии топлива. Электроэнергии в количестве равном 20% и тепловой энергии – 74%;
- во втором варианте КПД_ε = $2 \cdot 10^{-1}\%$, общее количество отпускаемой энергии равно 108% энергии топлива, при снижении доли электрической составляющей до 5%.

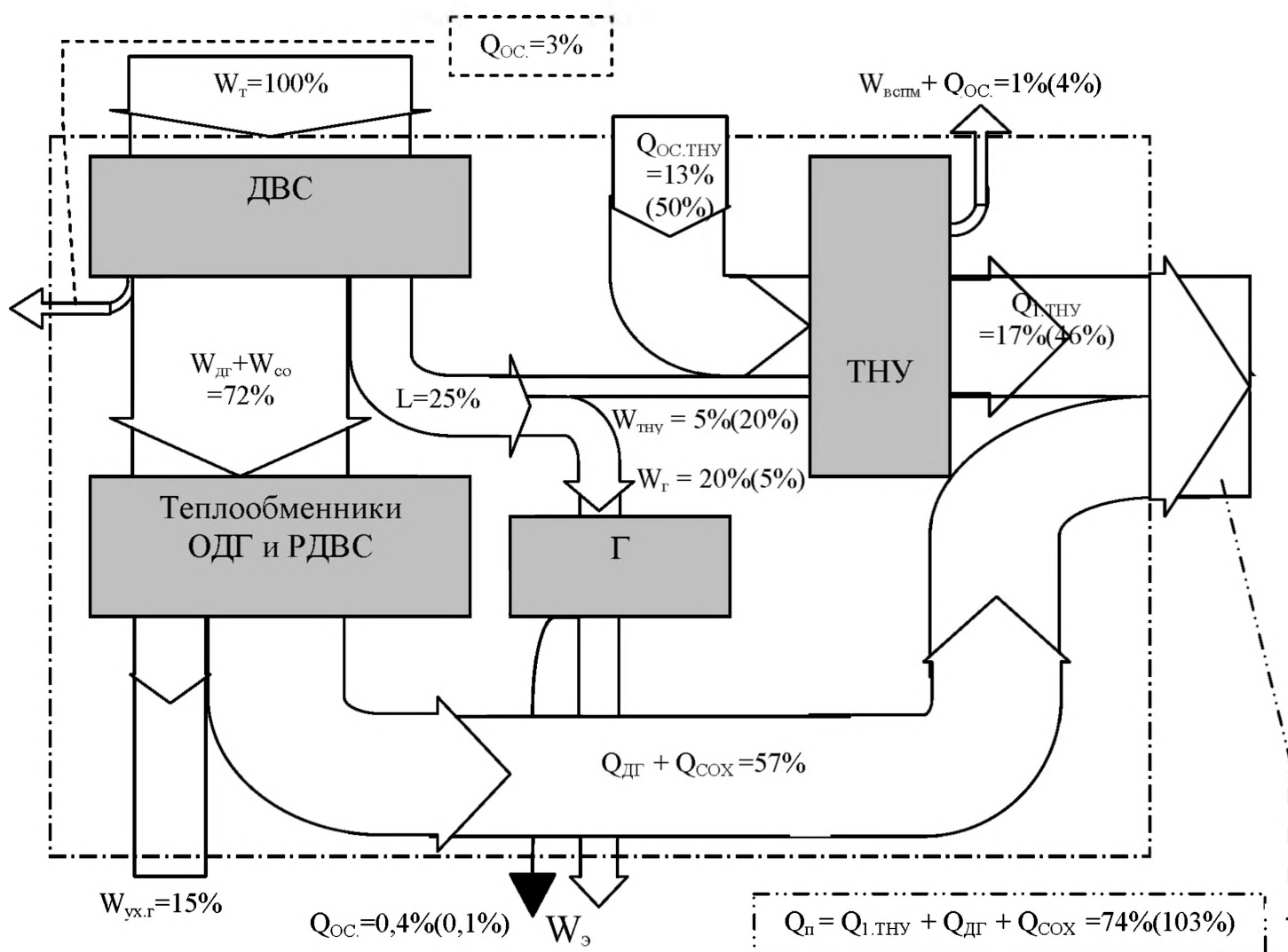


Рис. 5.18. Энергобаланс МТЭЦ в комбинации с ТНУ: W_T – энергия топлива; L – работа ДВС; $W_э$ – электроэнергия потребителю; $Q_п$ – тепловая нагрузка потребителю; $W_{ух.г}$ – энергия уходящих газов; $W_{дг}$, $W_{со}$ – соответственно энергия выхлопных газов и охлаждающей жидкости, покидающих ДВС; $Q_{ОС}$ – рассеяние энергии в форме теплоты в окружающую среду; $Q_{1.ТНУ}$, $Q_{ДГ}$, $Q_{СОХ}$ – соответственно потоки теплоты от ТНУ, от дымовых газов, от системы охлаждения ДВС, обеспечивающих поток теплоты потребителя; $Q_{ОС.ТНУ}$ – поток тепловой энергии из окружающей среды к ТНУ; $W_{ТНУ}$ – энергия на привод компрессора ТНУ; $W_Г$ – энергия на привод электрогенератора.

Из анализа баланса энергии можно сделать противоположный, неверный вывод о большей эффективности второго варианта, поскольку простая сумма энергий, от-

пускаемой в виде тепловой энергии и электроэнергии, во втором случае получается больше.

Для технологических целей в ряде случаев требуется насыщенный пар в качестве теплоносителя, что требует включения в схему, наряду с газо-водяным теплообменником, парового котлоагрегата. В этом случае может быть предложена схема теплофикационной установки, где температура дымовых газов перед котлоагрегатом оптимизируется по той или иной целевой функции. Выхлопные газы ДВС содержат избыточный кислород, поскольку коэффициент избытка воздуха, в газах отходящих от поршневого ДВС, колеблется в диапазоне 1,5 – 2, в зависимости от режима работы ДВС. Кислород выхлопных газов может быть использован в качестве окислителя в котлоагрегате, при этом температура продуктов сгорания достигает $1,5 \cdot 10^3$ °С. Значение последней, как выше подчеркивалось, оптимизируется по той или иной целевой функции и от этой температуры зависят размеры КА, потери от необратимости, рассеяние энергии с уходящими газами и пр. Во всем остальном работа КА и МТЭЦ ничем не отличается от выше рассмотренных аналогов.

5.4.2. Высокотемпературные надстройки теплотехнологических процессов

Ранее уже отмечалось: на основе только баланса энергии, без привлечения второго закона термодинамики нельзя определить пути совершенствования энергетического обеспечения производственных процессов.

Игнорирование данного факта дало жизнь далеко не лучшим структурным схемам набора оборудования для обеспечения теплотехнологических процессов. В результате при любых модернизациях оборудования без изменения структуры теплотехнологической системы, они принципиально не могут обеспечить эффективное энергоиспользование. Рациональное построение теплоэнергетической системы промышленного предприятия – основной путь снижения энергопотребления на выпуск единицы продукции.

При рассмотрении потоков эксергии технической системы (рис.3.4) указывалось на различные роли внутренних и внешних потерь эксергии. Внешние потери связаны с условиями сопряжения системы и окружающей среды, с величиной

сбросных потоков в последнюю. Роль внутренних потерь демонстрировалась на примере процессов детандирования (расширения) пара, рис.3.6. Из вышерассмотренных теплонасосных установок, тепловых аккумуляторов энергии, теплофикационных установок, первые две связаны с уменьшением внешних потерь эксергии той или иной технической системы. Непосредственная связь внешних потерь эксергии с потоками рассеяния энергии облегчает понимание и внедрение соответствующих энергосберегающих мероприятий. С уменьшением внутренних потерь эксергии ситуация более сложная.

Теплофикационная установка, рассмотренная ранее, где комбинированно вырабатываются два продукта (электроэнергия и теплота), состоит из двух подсистем. Одна из них, вырабатывающая электроэнергию, расположена на горячем торце технологического процесса, вторая, связанная с получением водяного теплоносителя, - на холодном торце. Электрогенерирующая часть характеризуется высокой эксергией своего продукта (поток электроэнергии равен потоку эксергии) и, при отдельном функционировании обеих подсистем, наличием внешних потерь на холодном технологическом торце. Теплогенерирующая подсистема, в свою очередь, имеет конечный энергетический продукт, эксергия которого много меньше его энергии, и при использовании в качестве энергоресурса непосредственно топлива, большие внутренние потери на своем горячем технологическом торце.

Интеграция таких подсистем в единую установку устраняет внешние потери эксергии в высокотемпературной, и существенно снижает внутренние потери в низкотемпературной частях. Из проведенного рассмотрения вытекает, что для низкотемпературных технологий необходим соответствующий энергоресурс, который следует получать не сжиганием топлива в топке перед технологическим агрегатом (в процессе связанном с деградацией первичного энергоресурса), а в ходе генерации того или иного полезного высокопотенциального (термодинамически более ценного) эффекта, в конкретном примере - электроэнергии. Естественно, необходим подбор теплотехнологий, взаимно дополняющих друг друга, сопрягающихся по характеристикам хотя бы одного из сбросных и входных потоков. На этом и базируется энерготехнология производства, поскольку наибольшие возможности для

экономии энергии в промышленности следует отнести на счет многократного использования энергии

Сжигание топлива – типичный пример технологического процесса, в котором за счет химической реакции между топливом и окислителем образуется целевой продукт – дымовые газы. В промышленности применяются топки, работающие на твердом, жидком, газообразном топливе. Природный газ будет доминировать в энергобалансе ближайшие десятилетия и именно природный газ можно и должно использовать с большей термодинамической эффективностью. Задача повышения эффективности использования природного газа не менее чем в полтора раза стоит сегодня перед энергетиками. В теплотехнологических системах преобразования вещества реально добиться еще более заметных результатов.

Рассмотрим баланс эксергии процесса горения

$$E_T + E_{ок} = E_{дг} + \Sigma D. \quad (5.1)$$

Здесь E_T , $E_{ок}$, $E_{дг}$ – соответственно эксергия топлива, окислителя, дымовых газов; ΣD – потери эксергии в ходе процесса горения, которые состоят из внутренних и внешних. Внешние потери процесса горения связаны с рассеянием энергии теплового потока через ограждающие конструкции топки, механическим и химическим недожогом. Первые определяются в соответствии с соотношением (3.11)

$$D_e = Q_{ос}(1 - T_o/T_{гор.т}), \quad (5.2)$$

где $Q_{ос}$, кДж – поток теплоты через стенки топки в единицу времени; T_o , К – температура окружающей среды, при расчете процесса горения принимают $t_o = 0^\circ\text{C}$; $T_{гор.т}$, К – теоретическая температура горения топлива, в случае процесса горения природного газа, когда окислителем является воздух при температуре окружающей среды, $t_{гор.т} = 2000 - 2050^\circ\text{C}$.

Потери от недожогов, при правильной организации горения природного газа, отсутствуют.

Внутренние потери реакции окисления топлива связаны с необратимостью процесса горения и могут определяться из баланса эксергии

$$D_i = E_T + E_{ок} - E_{дг} - D_e. \quad (5.3)$$

Для реакции окисления требуется некоторое количество воздуха, называемое теоретическим расходом воздуха V_0 . Для процесса горения подается большее коли-

чество воздуха V_d . Отношение второго к первому называют коэффициентом избытка воздуха (α), подаваемого для протекания процесса горения. Величина коэффициента избытка воздуха совместно с видом топлива определяют температуру и состав дымовых газов. Последние удобно считать состоящими из продуктов сгорания и избыточного воздуха. Смешение продуктов сгорания и воздуха может осуществляться непосредственно в топке, специальной камере смешения либо в других элементах теплотехнического устройства. Для упрощения анализа будем принимать, что технологический процесс получения дымовых газов осуществляется в топочном агрегате, состоящем из топки и камеры смешения. В топку подается теоретически необходимое для горения количество воздуха. Весь избыточный воздух, необходимый для обеспечения технологического процесса, подается в камеру смешения. Баланс эксергии топочного агрегата имеет вид, показанный на рис. 5.19. Получается он на основе материального и энергетического баланса процесса сжигания топлива.

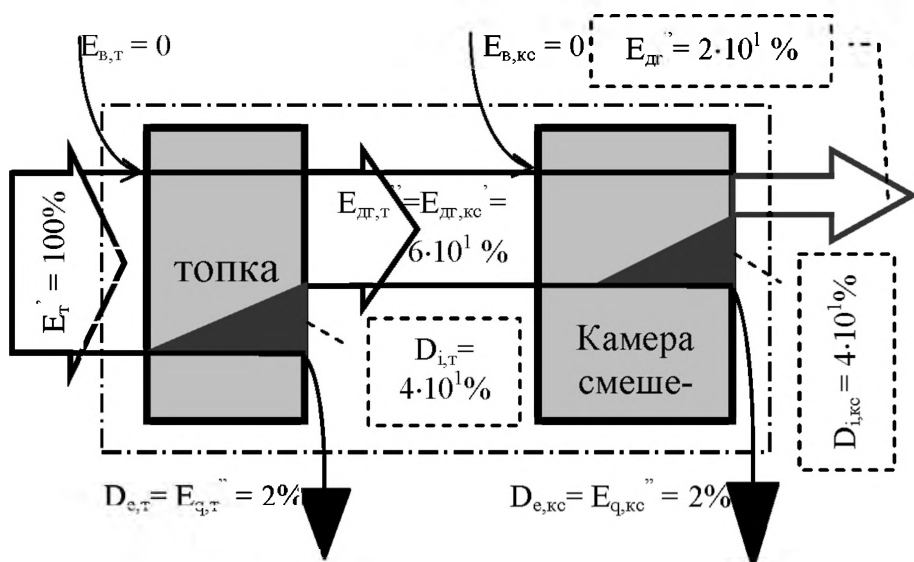


Рис.5.19. Диаграмма потоков эксергии топочного агрегата, где эксергии: E_T – потока топлива; $E_{в,т}$, $E_{в,к}$ – потока атмосферного воздуха соответственно в топку и в камеру смешения; $E_{дг}$ – дымовых газов; E_q – эксергия потоков теплоты; D_e , D_i – соответственно внешние и внутренние потери эксергии.

$$E_T = 1,04 \cdot Q_b^p = 1,04 \cdot 40,08 = 41,68 \text{ МДж/м}^3.$$

Эксергия воздуха, поступающего на горение и смешение, равна нулю, поскольку он находится в состоянии равновесия с окружающей средой. Тепловой поток в окружающую среду от топки и камеры смешения можно считать равным 2% от теплоты сгорания топлива, что с помощью (5.2) определяет величину его эксергии 6

на основе материального и энергетического баланса процесса сжигания топлива.

Рассмотрим баланс непосредственно топки. За 100% принята эксергия природного газа, имеющего низшую теплоту сгорания на рабочую массу $Q_n^p = 35,8 \text{ МДж/м}^3$, высшую теплоту сгорания – $Q_b^p = 40,08 \text{ МДж/м}^3$. Эксергия природного газа может быть определена по соотношению

МДж/м³ или 1,5% входа системы. Эксергия продуктов сгорания, покидающих топку и отнесенная к кубическому метру природного газа, определяется с помощью соответствующих расчетных зависимостей или диаграмм. В данном случае получаем $\epsilon_{д.г} = 26 \text{ МДж/м}^3$, что составляет 62% входа и позволяет *определить внутренние потери эксергии процесса горения* на уровне $4 \cdot 10^1\%$. Их величину можно уменьшить, используя подогрев окислителя и топлива, но, в любом случае, внутренние потери эксергии в ходе реакции горения природного газа сохраняются не менее 30%.

Рассмотрим далее другой характерный элемент многих теплотехнологических агрегатов, которым является камера смешения. Приведем баланс эксергии камеры смешения при условии, что на выходе из нее по технологическим требованиям необходимы дымовые газы с температурой 300°C. Эксергия дымовых газов, образованных смешением продуктов сгорания с воздухом, определяется аналогично и при $t = 300^\circ\text{C}$ равна 11 МДж/м^3 . Это составляет 26% эксергетического входа камеры смешения, рассчитанного выше. *Внутренние потери эксергии при смешении в конкретном примере составляют величину 36% входа, т.е. от эксергии топлива.*

Таким образом, в системе «топка-камера смешения» только внутренние потери эксергии составляют $6 \cdot 10^1\%$. Полученные результаты говорят сами за себя и объясняют эффект энерготехнологии, где, во-первых, эти потери существенно сокращаются, поскольку отсутствует или существенно снижено смешение продуктов реакции окисления с воздухом. Во-вторых, потери эксергии делятся между несколькими продуктами, что ослабляет их относительный вес в каждом из продуктов. Результат можно проиллюстрировать на том же, всем известном, примере паросиловой установки тепловой электростанции. Основные потери эксергии ($\approx 50\%$) приходятся на котлоагрегат, и в их уменьшении находится основной резерв повышения экономичности. Температура рабочего тела в цикле ПСУ 565°C и в обозримом будущем выше не поднимется, что определяет ее КПД = $4 \cdot 10^1\%$. В этой ситуации остается единственный выход в интеграции ПСУ с некой высокотемпературной технологией. Наиболее естественно для тепловой электростанции в объединении ПСУ с газотурбинной установкой. Уже на базе современных технических достижений возможно увеличение КПД такой комбинированной электрогенерирующей парогазовой уста-

новки до $6 \cdot 10^1\%$, т.е. в 1,5 раза. Дальнейшее строительство и модернизация тепловых электростанций на природном газе будет идти только в этом направлении.

Подобное комбинирование низкотемпературных и высокотемпературных технологий возможно и, в плане энергосбережения, перспективно не только в системах преобразования энергии, но и в системах преобразования вещества в различных отраслях промышленности, аграрном секторе, транспорте и пр. Например, в такой достаточно высокотемпературной теплотехнологии, как производство цемента, энерготехнологический подход к выбору структуры теплоэнергетической системы на базе электрических газотурбинных установок, интегрированных в технологическую систему, снижает себестоимость цемента на 27%. Эффективность интеграции газовых двигателей, к которым относятся и вышеназванные установки, возрастает для низкотемпературных теплотехнологий, где удельные затраты энергии на традиционный продукт технологии снижаются на порядок. При этом, безусловно, имеет место усложнение эксплуатации, требуется повышение культуры обслуживания и квалификации обслуживающего персонала, необходимы современные системы автоматического управления технологическими процессами и перестройка отношений между службами предприятия. Но, одновременно, имеет место снижение удельного энергопотребления на такую величину, при которой имеющиеся технологические процессы получают право на дальнейшую жизнь. За подобным энергообеспечением теплотехнологий, рациональным с позиций второго закона термодинамики, будущее. Как будет показано ниже, оно позволяет снизить на порядок удельные затраты энергии на получение асфальтобетонной смеси и производство железобетонных изделий.

6. Повышение эффективности использования электрической энергии

6.1. Рациональное использование электроэнергии в промышленности

При решении вопросов электросбережения в промышленности должен применяться системный подход, который заключается во взаимосвязанном рассмотрении предприятий конкретного региона, их инфраструктур и производств. Вследствие этого рациональному использованию энергоресурсов на промышленных предпри-

ятиях должно уделяться постоянное внимание специалистов разного профиля – энергетиков, технологов, механиков, строителей и т. д.

Опыт высокоразвитых стран показывает, что максимальный эффект в энергосбережении дает структурная перестройка промышленности с целью уменьшения доли энергоемких предприятий в общем объеме производства. Снижению удельных расходов электроэнергии способствует специализация и концентрация отдельных энергоемких производств на предприятиях, имеющих современное энергоэффективное технологическое оборудование. Такие предприятия должны обеспечивать требуемыми деталями, узлами и заготовками заводы, имеющие малые объемы указанных производств и неэффективное оборудование. Естественно, что на предприятиях энергоемкие производства, технический уровень которых не соответствует современным требованиям, должны быть остановлены или модернизированы.

В целях экономии энергоресурсов на предприятиях следует сокращать объемы выпуска и даже снимать с производства энергоемкую нерентабельную продукцию, осваивать менее энергоемкие промышленные изделия.

Мероприятия по экономии электроэнергии на промышленных предприятиях можно разделить на конструктивные и эксплуатационные. К первым относятся мероприятия, требующие дополнительных капиталовложений, связанных с применением нового энергоэффективного оборудования и регулирующих устройств, установкой дополнительных средств компенсации реактивной мощности и т. п. Ко вторым – малозатратные мероприятия, для осуществления которых не требуется существенных материальных и денежных затрат: своевременное отключение недостаточно загруженных трансформаторов, установление рациональных режимов работы технологического оборудования, линии, трансформаторов и высоковольтных двигателей.

Для того, чтобы выявить потенциальные возможности энергосбережения, необходимо знать, в каком количестве и на какие нужды электроэнергия расходуется. С этой целью следует осуществлять учет и контроль электропотребления предприятия, его структурных подразделений и отдельных энергоемких электроприемников. Приборы технического учета устанавливать у каждого электроприемника экономически не оправдано и практически трудно осуществимо. *Поэтому весьма важно разместить электрические счетчики таким образом, чтобы они позволяли опреде-*

лять расход электроэнергии на единицу продукции при нормировании электропотребления, составлении электрических балансов и проведении энергетических аудитов (энергетических обследований) на предприятии.

Автоматизация учета и контроля электропотребления на базе современных систем (типа ЭРКОН, СИМЭК, СЭМ-1 и т. п.) позволяет не только регистрировать показания счетчиков, но и способствует рациональному использованию электроэнергии. Как показывает опыт эксплуатации, применение автоматизированных систем учета и контроля снижает расход электроэнергии на величину, достигающую 5 % от общего электропотребления промышленного объекта.

На режимы потребления существенное влияние оказывают действующие тарифы на электроэнергию. Тарифы должны учитывать интересы как энергосистемы, поставляющей электроэнергию, так и потребителей. *В наибольшей степени этому требованию отвечает дифференцированный по времени суток тариф, предусматривающий плату за электроэнергию, зафиксированную приборами учета, по разной стоимости кВт·ч в ночной, дневной и пиковой зонах.* Дифференцированный тариф прост и нагляден для потребителей и несложен в технической реализации. Поэтому он широко применяется во многих странах мира. Значительное количество промышленных предприятий Республики Беларусь также рассчитываются с энергосистемой за потребленную электроэнергию по дифференцированному тарифу. Дальнейшее совершенствование тарифов на энергоносители всех видов будет содействовать более эффективному использованию энергоресурсов на предприятиях.

При проектировании и эксплуатации электрооборудования и систем электроснабжения промышленных предприятий должны приниматься технические решения, обеспечивающие рациональное электропотребление как отдельных технологических установок, так и промышленного объекта в целом. Расход электроэнергии в производственных процессах является функцией многих переменных. Наибольшую эффективность в энергосбережении на промышленных предприятиях имеют следующие основные направления:

- 1) применение для производственных процессов рациональных видов и параметров энергоносителей (электроэнергии, горячей воды, пара, сжатого воздуха и т. п.);
- 2) использование вторичных энергоресурсов;

- 3) применение энергоэффективных технологий и оборудования;
- 4) интенсификация производственных процессов;
- 5) сокращение потерь электроэнергии в электрооборудовании и электрических сетях;
- 6) улучшение энергетических режимов производственного и электрического оборудования;
- 7) автоматизация управления технологическими установками.

Эффективность применения оптимальных энергоносителей и их параметров обуславливается тем, что для осуществления технологических процессов могут использоваться разные виды энергоносителей. Оптимизация видов и параметров энергоносителей на основе технико-экономических расчетов является важным элементом энергосбережения.

Для обеспечения рационального электропотребления на промышленном предприятии необходимо наладить эффективную эксплуатацию электродвигателей, электротехнологических установок, осветительных приборов, насосов, вентиляторов, компрессоров и т. п. Пути совершенствования их использования рассмотрены в соответствующих разделах данного пособия. Здесь дополнительно укажем, что для снижения расхода электроэнергии на выработку сжатого воздуха на некоторых предприятиях может оказаться полезной децентрализация компрессорных станций с установкой локальных компрессоров небольшой производительности на тех производственных участках, где сжатый воздух необходим для обеспечения непрерывного режима работы технологического оборудования, пожарной безопасности и т. д. Обеспечение сжатым воздухом отдельных периодически работающих установок может осуществляться от передвижных компрессоров малой производительности.

Ощутимую экономию электроэнергии можно получить сокращением ее потерь в производственном и энергетическом оборудовании, а также в элементах системы электроснабжения предприятия. Весьма значительными могут быть потери на трение у разнообразных производственных механизмов, станков, транспортеров и приводов из-за их недоброкачественной смазки. В среднем своевременная и доброкачественная смазка машин и механизмов позволяет уменьшить их потребление электроэнергии на 0,5—1,5 %.

Улучшение энергетических режимов оборудования достигается рациональной загрузкой технологических агрегатов, выбором энергетически целесообразных режимов работы и графиков нагрузки электрооборудования, линий электропередачи и производственных установок и т. п. Особенно важно поддерживать оптимальные режимы работы для электрических печей и других электроемких электроприемников. Существенное влияние на эффективность использования электроэнергии на промышленных предприятиях имеют рациональное построение системы электроснабжения и правильный выбор применяемого электрооборудования. *Важным резервом снижения электроемкости продукции является автоматизация технологических процессов, использующих электроэнергию. Это мероприятие уменьшает электропотребление примерно на 2—3 %.*

Для планирования мероприятий по экономии электроэнергии целесообразно составить электрический баланс, являющийся основой для анализа состояния электрического хозяйства, выявления резервов экономии энергоресурсов и установления норм расхода электроэнергии на единицу продукции.

Для промышленных предприятий основным является электрический баланс по активной энергии. При этом в качестве объектов электропотребления рассматриваются наиболее электроемкие технологические установки, цеха и предприятие в целом. Электрический баланс состоит из приходной и расходной частей, численно равных друг другу. Приходная часть отражает сведения о количестве энергии, поступившей к объекту, расходная – о полезном потреблении электроэнергии и ее потерях. В зависимости от времени разработки различают проектный, плановый, отчетный (фактический) и перспективный электрические балансы.

6.2. Энергетические расходные характеристики приемников и потребителей электроэнергии

Электроприемник – это аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии, а потребитель – это электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Производственные механизмы и установки могут существенно различаться по количеству и виду применяемых в них электроприемников. В некоторых из них, например, в простейших металлообрабатывающих станках, насосах, вентиляторах и др., используется только один электродвигатель. В то же время дуговая сталеплавильная печь, являющаяся крупным потребителем электроэнергии, содержит несколько электроприемников: плавильный агрегат, приводы наклона и поворота ванны, подъема и отворота свода, источник оперативного тока для цепей управления, защиты и блокировки и т. д. Естественно, что промышленные предприятия и объекты, жилые и общественные здания являются потребителями электроэнергии.

К основным электроприемникам электроэнергии относятся электродвигатели производственных механизмов, силовые общепромышленные установки (насосы, вентиляторы, компрессоры, подъемно-транспортные устройства), осветительные установки, преобразовательные установки, электрические печи и электротермические установки.

Расход электроприемником (потребителем) электроэнергии W за некоторое время t наиболее точно определяется по показаниям интегрирующих приборов (электрических счетчиков, систем учета и контроля электропотребления и т. п.). В этом случае средняя мощность, потребляемая за время t , вычисляется по формуле

$$P = \frac{W}{t}. \quad (6.1)$$

При известном значении средней мощности расход электроэнергии определяется по выражению

$$W = P \cdot t. \quad (6.2)$$

Важной характеристикой использования энергоресурсов на предприятиях является расход электроэнергии на единицу продукции

$$w_y = \frac{W}{\Pi}, \quad (6.3)$$

где Π – количество продукции, произведенной за время работы.

Подставив (6.2) в (6.3), получим

$$w_y = \frac{P \cdot t}{\Pi}. \quad (6.4)$$

Часовая производительность оборудования вычисляется по формуле

$$A = \frac{\Pi}{t}. \quad (6.5)$$

Величина, обратная производительности, представляет собой удельные затраты времени на выработку единицы продукции

$$t_y = \frac{t}{\Pi}. \quad (6.6)$$

Показатели A и t_y характеризуют эффективность работы технологического оборудования.

Из выражения (6.5) следует

$$\Pi = A \cdot t. \quad (6.7)$$

С учетом полученного соотношения формула (6.4) может быть представлена в таком виде

$$w_y = \frac{P}{A}. \quad (6.8)$$

Для оценки экономичности работы оборудования, приемников и потребителей электроэнергии применяются энергетические расходные характеристики. Они отражают зависимость потребляемой мощности, абсолютного или удельного расхода электроэнергии от выпуска продукции за календарный отрезок времени (сутки, месяц и т. п.) или от часовой производительности агрегата, участка, цеха, предприятия.

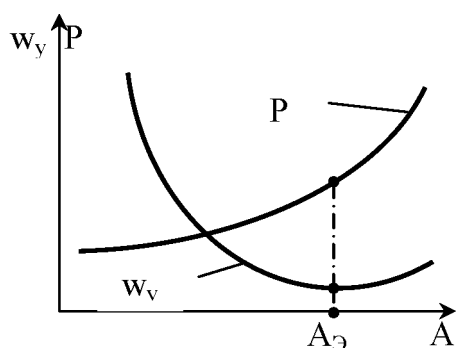


Рис.6.1. Энергетическая характеристика (вогнутая)

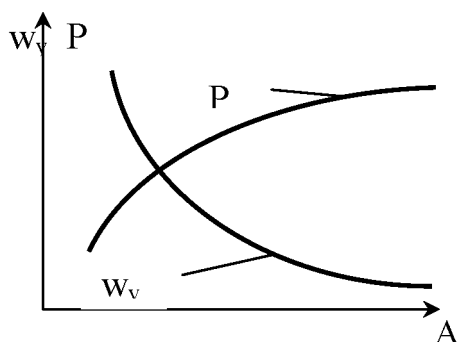


Рис.6.2. Энергетическая характеристика (выпуклая)

Типовые формы энергетических характеристик оборудования показаны на рис. 6.1 – 6.4. Нормальные характеристики потребляемой мощности отражают рис. 6.1 – 6.3. На рис.6.1 дана вогнутая характеристика, которая может иметь точку минимума удельного расхода электроэнергии при экономической производительности $A_э$. Вогнутыми характеристиками обладают наклонные ленточные транспортеры, вентиляторы с загнутыми вперед лопастями, ковшовые элеваторы и т. п.

Выпуклыми характеристиками обладают горизонтальные ленточные транспортеры, вентиляторы с прямыми лопастями, винтовые элеваторы и т. п.

К оборудованию с выпуклыми характеристиками (рис. 6.2) относятся центробежные насосы, вентиляторы с загнутыми назад лопастями и т. п.

подавляющее большинство производственного оборудования имеет практически прямолинейные характеристики в зоне рабочих нагрузок (рис. 6.3). К указанно-

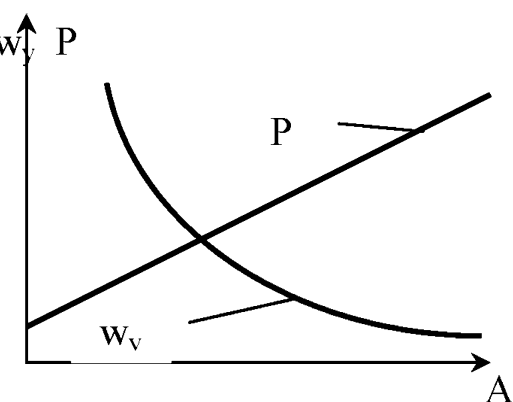


Рис. 6.3. Энергетическая характеристика (прямолинейная)

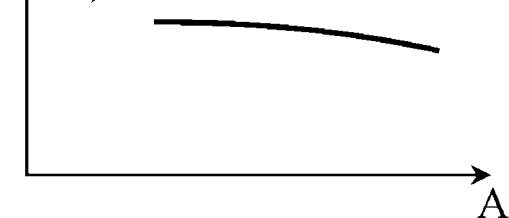


Рис. 6.4. Энергетическая характеристика (анормальная)

му оборудованию принадлежат горизонтальные ленточные транспортеры, центробежные насосы с пологими характеристиками, центробежные вентиляторы с радиальными лопастями, компрессоры, дробилки, автоматические прессы, электрические печи, электролизеры и т. п.

Для оборудования с характеристиками, показанными на рис. 6.2 и 6.3, удельный расход электроэнергии w_y с увеличением производительности A снижается и достигает минимума при максимальном значении A .

В редких случаях могут встречаться аномальные характеристики (рис. 6.4), при которых величина потребляемой мощности снижается при повышении производительности. Такую форму характеристики имеют, например, шаровые мельницы.

Энергетические характеристики используются для установления оптимальных технологических параметров оборудования при нормировании удельных расходов электроэнергии и выявлении потенциала энергосбережения на промышленных предприятиях. Увеличивая нагрузку рабочих машин до оптимального значения, можно добиться снижения расхода электроэнергии, что повышает эффективность использования энергоресурсов на предприятии.

Уравнение прямолинейной характеристики потребляемой мощности оборудования имеет вид

$$P = \Delta P_x + w_{\text{п}} A, \quad (6.9)$$

где ΔP_x – постоянные потери активной мощности (потери холостого хода);

$w_{\text{п}}$ – удельная величина переменных расходов электроэнергии на единицу продукции.

Разделив все члены уравнения (6.9) на часовую производительность оборудования A , получим выражение для определения удельного расхода электроэнергии оборудования с прямолинейной характеристикой

$$w_y = \frac{\Delta P_x}{A} + w_{п}. \quad (6.10)$$

Следовательно, оборудование с прямолинейной характеристикой для снижения удельного расхода электроэнергии должно работать с возможно большей производительностью, близкой к предельно допустимой. Если по условиям производства не удастся полностью загрузить технологическое оборудование, то для улучшения энергетического режима целесообразно работать с перерывами, увеличивая производительность до номинального значения в период работы.

Из уравнения (6.10) следует, что чем относительно больше мощность постоянных потерь по сравнению с общей потребляемой мощностью оборудования при максимальной нагрузке, тем сильнее увеличивается удельный расход электроэнергии при снижении нагрузки относительно ее максимальной величины.

Нелинейные характеристики потребляемой мощности агрегатов (рис. 6.1, 6.2, 6.4) зависят от структуры потерь и от соотношения между потерями и полезной энергией. Поэтому они могут выражаться уравнениями различных видов и степеней.

Удельный переменный расход электроэнергии потребителей с нелинейными характеристиками не является постоянной величиной, а зависит от производительности. Причем у вогнутых характеристик с увеличением производительности она возрастает, а у выпуклых – снижается.

Энергетические характеристики строят по приближенным расчетным формулам, полученным с определенными допущениями в отношении физических закономерностей исходных расчетных показателей, либо на основе экспериментальных данных. В последнем случае уравнение расходной характеристики получают методами аппроксимации (сглаживания).

Суммарное потребление электроэнергии электроприемниками предприятия может быть представлено в таком виде

$$W = W_T + W_B + \Delta W_x + \Delta W_{н}, \quad (6.11)$$

где W_T – расход электроэнергии на технологический процесс;

W_B – расход электроэнергии на вспомогательные и хозяйственные нужды предприятия (освещение, вентиляция, отопление, промышленный транспорт, подсобные производства и т. д.);

ΔW_X и ΔW_H – потери электроэнергии холостого хода и нагрузочные потери в производственных агрегатах и элементах системы электроснабжения.

Расход электроэнергии на единицу продукции предприятия можно выразить следующим образом:

$$w_y = \frac{W_T}{\Pi} + \frac{W_B}{\Pi} + \frac{\Delta W_X}{\Pi} + \frac{\Delta W_H}{\Pi}. \quad (6.12)$$

При увеличении выпуска продукции за одно и то же время, т. е. при повышении производительности, второй и третий члены выражения (6.12) уменьшаются. Остальные составляющие удельного расхода могут уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменными. Так как постоянные потери и расход электроэнергии на вспомогательные и хозяйственные нужды составляют около 30–50 % от суммарного электропотребления, то интенсификация производственных процессов приводит к снижению удельного электропотребления.

В ходе производственного процесса удельные расходы могут изменяться вследствие внедрения новой техники, совершенствования технологии, автоматизации производства, перевода отдельных установок на другие энергоносители, сезонных факторов, брака продукции и т. п. Изменяется также и производительность оборудования из-за нестандартности сырья и продуктов обработки, непостоянства внешних условий, улучшения технологических параметров работы, нарушения технологической дисциплины, износа и загрязнения оборудования и т. п.

Часть из перечисленных факторов является положительными, обуславливающими увеличение производительности оборудования и снижение удельного расхода электроэнергии, а часть отрицательными, снижающими производительность и повышающими удельный расход энергии, что необходимо учитывать при разработке мероприятий по энергосбережению.

Применение в промышленности энергоэффективных технологий и оборудования позволяет производить выпуск продукции с меньшими значениями удельных расходов электроэнергии.

К прогрессивным технологиям можно отнести использование электростатического поля для окраски изделий, сортировки и смешивания материалов, плазменный нагрев, поверхностную закалку с помощью лазерных установок и токами высокой частоты, автоматическую сварку на переменном токе, электроискровую и электроимпульсную обработку металлов, перевод изделий с металлообработки на штамповку (если это допускается по техническим условиям), замену в некоторых случаях фрезерования штамповкой, применение индукционного нагрева деталей вместо нагрева в печах сопротивления и т. п.

Большое значение для энергосбережения имеет также интенсификация производственных процессов, например повышение скорости резания обрабатывающих станков, ускорения нагрева путем увеличения удельной мощности без изменения вида нагрева и т. п. Должное внимание необходимо уделять улучшению энергетических режимов электроприводов на основе регулирования частоты вращения двигателей и скорости подачи изделий, материалов или продуктов.

6.3. Основы рационального использования электродвигателей

Для привода разнообразных механизмов и установок используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым и фазным ротором, синхронные электродвигатели и двигатели постоянного тока. Выбор того или иного типа электропривода зависит от требований, предъявляемых к нему технологическими установками, и оказывает влияние на величину потребляемой электроэнергии.

Асинхронные электродвигатели получили наибольшее распространение в различных отраслях народного хозяйства. Это объясняется их простотой устройства, надежностью работы и удобством эксплуатации.

Рассмотрим некоторые рабочие характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя, влияющие на электропотребление. Расход электрической энергии двигателем зависит от потребляемой им мощности, продолжительности работы, частоты включений, а также параметров питающей электрической сети. В общем случае КПД электродвигателя может быть представлен как

$$\eta = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}, \quad (6.13)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем из сети;

$\sum \Delta P$ – суммарные потери мощности в двигателе:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}, \quad (6.14)$$

где $\Delta P_{\text{пост}}$ и $\Delta P_{\text{пер}}$ – соответственно постоянные и переменные потери мощности в двигателе.

При условии незначительного изменения напряжения и частоты в питающей сети к постоянным потерям можно отнести магнитные потери в стали (на гистерезис и вихревые токи) $\Delta P_{\text{м}}$, а также механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (6.15)$$

Механические потери на трение в подшипниках и вентиляцию электродвигателя относительно невелики (5—10 % от суммарных потерь мощности) и их уменьшению способствует своевременная и качественная смазка подшипниковых узлов, а также правильная эксплуатация двигателя.

Переменные потери мощности включают в себя электрические потери в обмотках статора и ротора $\Delta P_{\text{э}}$, добавочные потери $\Delta P_{\text{д}}$, вызванные высшими гармоническими составляющими в кривой тока и эффектом вытеснения тока, электрические потери в щеточном контакте $\Delta P_{\text{эщ}}$ (в двигателях с фазным ротором):

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{эщ}}. \quad (6.16)$$

Переменные потери зависят от квадрата тока нагрузки двигателя.

При номинальной нагрузке КПД современных асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт составляет 0,92—0,96, мощностью 1—100 кВт – 0,7—0,9, а микромашин – 0,4—0,6 (бóльшие значения КПД относятся к машинам большей мощности).

Условием максимума КПД является такая нагрузка двигателя, при которой $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пост}}$. При проектировании электрических машин стремиться к тому, чтобы данное условие выполнялось при наиболее вероятной нагрузке двигателя, несколько меньшей номинальной. В двигателе средней и большой мощности это условие выполняется при нагрузках 60—85 % от номинальной.

Важным энергетическим показателем электродвигателей переменного тока является коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (6.17)$$

где S_1 – полная потребляемая мощность двигателя.

У большинства современных электродвигателей $\cos \varphi \approx 0,8—0,9$ при номинальной нагрузке. При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной на-

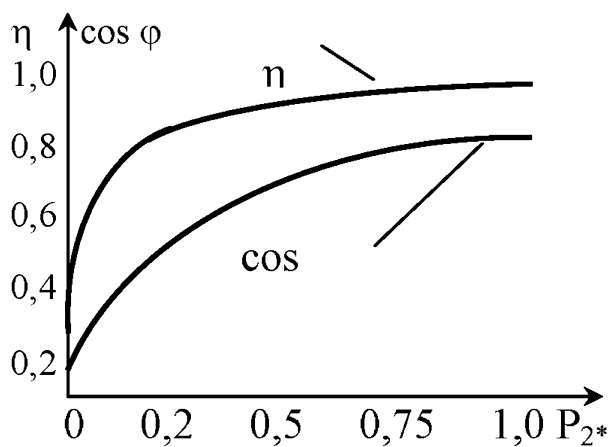


Рис.6.5. Зависимость КПД и $\cos \varphi$ от нагрузки двигателя

грузки коэффициент мощности возрастает от значения 0,08—0,15 до некоторой максимальной величины: 0,7—0,9 – у двигателей мощностью 1—100 кВт и 0,9—0,95 – у двигателей мощностью более 100 кВт.

На рис.6.5 показан примерный вид зависимости КПД и $\cos \varphi$ асинхронного электродвигателя от нагрузки, выраженной в относительных единицах: $P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2ном}}$ (здесь P_2 и $P_{2ном}$ – фактическая и номинальная мощности двигателя).

– фактическая и номинальная мощности двигателя).

Как видно из рис. 6.5, у современных асинхронных электродвигателей максимальное значение КПД достигается при $P_2 \approx 0,6 P_{ном}$ и в диапазоне нагрузок 0,6—1 от номинальной остается приблизительно одинаковым. Работа асинхронного электродвигателя при малых нагрузках, когда $\cos \varphi$ двигателя невелик, в энергетическом отношении нецелесообразна.

С целью обеспечения рационального электропотребления следует избегать длительной работы двигателей на холостом ходу и так организовывать технологический процесс, чтобы асинхронные электродвигатели были загружены в соответствии с их номинальной мощностью. Если двигатель значительную часть времени загружен менее чем на 40 % номинальной мощности, то для повышения коэффициента мощности целесообразно уменьшать напряжение, подаваемое на фазы обмотки статора. В двигателях, работающих при соединении обмоток статора в треугольник, этого можно достигнуть переключением обмоток в звезду. Переключение

вызовет уменьшение магнитного потока машины, а следовательно, и потребляемой реактивной мощности. Коэффициент мощности двигателя при этом повышается, (рис. 6.6).

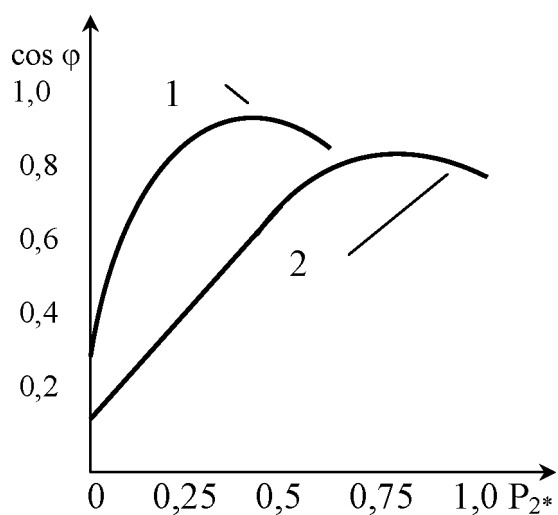


Рис.6.6. Зависимость $\cos \varphi$ от нагрузки двигателя при соединении обмотки звездой (1) и треугольником (2)

Для повышения эффективности работы электродвигателей напряжением до 1 кВ применяют автоматические ограничители холостого хода, которые обеспечивают экономию электроэнергии путем отключения электроприемников в межоперационный период. При интервале времени между операциями 10 с и более применение ограничителей холостого хода всегда приводит к экономии электроэнергии. При времени холостого хода менее 10 с целесообразность установки ограничителей и достигаемая при этом

экономия для электродвигателей может быть определена с помощью диаграммы, показанной на рис.6.7.

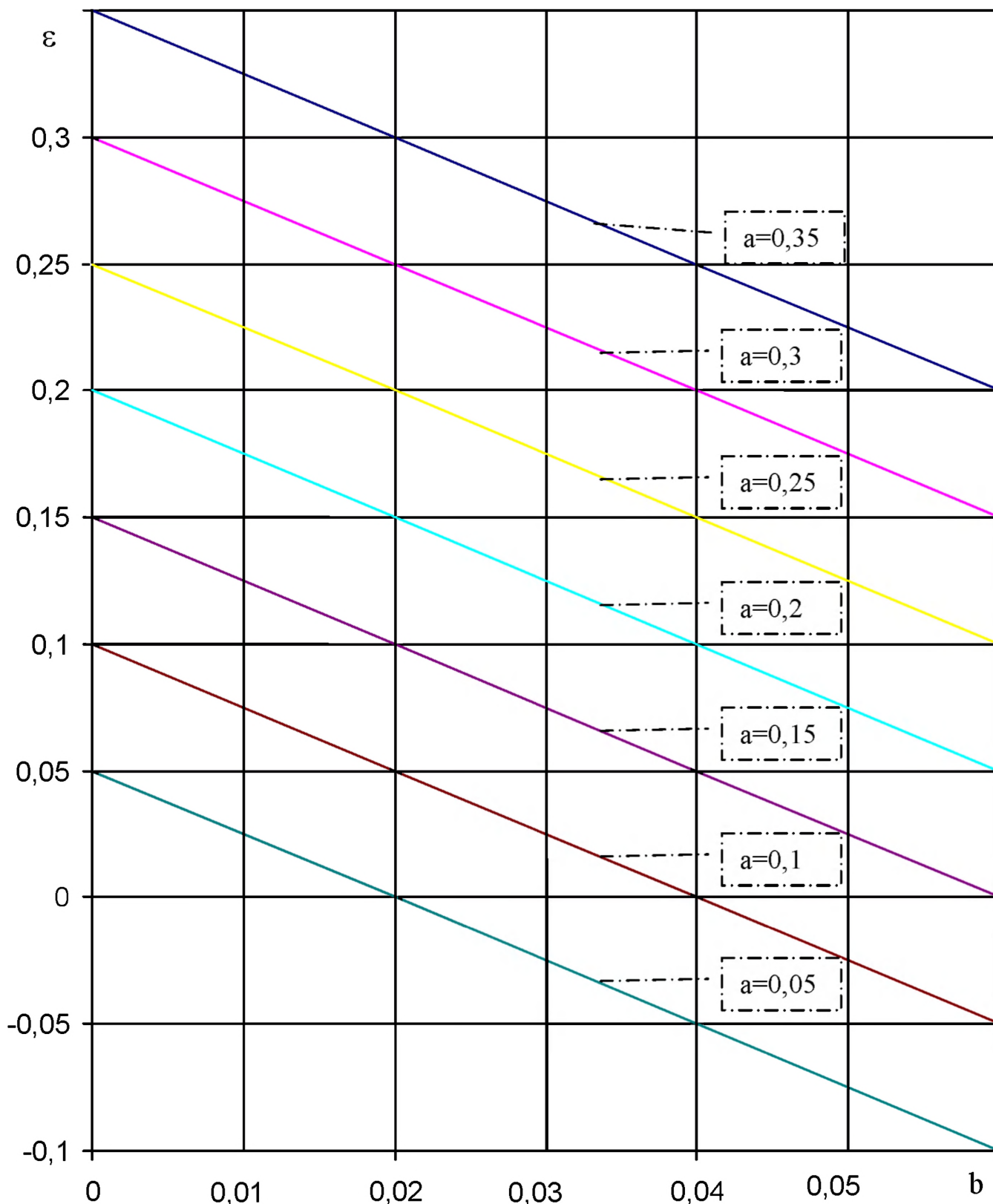


Рис.6.7. Диаграмма для определения целесообразности применения ограничителей холостого хода

Для пользования диаграммой необходимо знать среднюю мощность холостого хода $P_{сх}$, состоящую из механической мощности холостого хода и потери в стали двигателя, номинальную мощность двигателя $P_{2ном}$, продолжительность межоперационного времени $T_{всп}$, число циклов работы в час z .

По этим данным вычисляются параметры диаграммы:

$$a = \frac{P_{сх}}{P_{2ном}}; \quad b = \frac{1}{4T_{всп}}. \quad (6.18)$$

По параметрам a и b на диаграмме находят показатель эффективности ε . Затем определяется часовая экономия электроэнергии в системе электропривода по выражению

$$\Delta W = \frac{\varepsilon z P_{2ном} T_{всп}}{3600}. \quad (6.19)$$

Уменьшения расхода электроэнергии на электропривод производственных механизмов можно достичь заменой малонагруженных электродвигателей. Если систематическая средняя нагрузка двигателя составляет менее 45 % номинальной мощности, то замена его двигателем меньшей мощности всегда целесообразна. При нагрузке двигателя более 70 % номинальной мощности заменять его, как правило, не имеет смысла. Целесообразность замены двигателей с нагрузкой 45—70 % номинальной мощности определяется расчетом. Замена целесообразна, если в результате снижаются суммарные потери мощности. При этом следует учитывать, что чем ниже номинальная мощность электродвигателя, тем меньше номинальные значения КПД и коэффициента мощности.

С целью снижения удельного расхода электроэнергии многих производственных установок необходимо регулировать частоту вращения их приводных электродвигателей.

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей можно производить изменением величины подводимого напряжения или активного сопротивления в цепи ротора (для двигателей с фазным ротором), частоты тока, числа пар полюсов обмотки статора (для двигателей с короткозамкнутым ротором). Наибольшее распространение получили два последних способа, так как другие способы имеют низкую эффективность.

Для частотного регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой. В качестве таких источников могут использоваться преобразователи частоты (электромашинные, ионные или полупроводниковые). Наиболее эффективными являются тиристорные преобразователи частоты.

Упрощенная схема преобразователя частоты тока для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя М показана на рис.6.8. В состав преобразователя

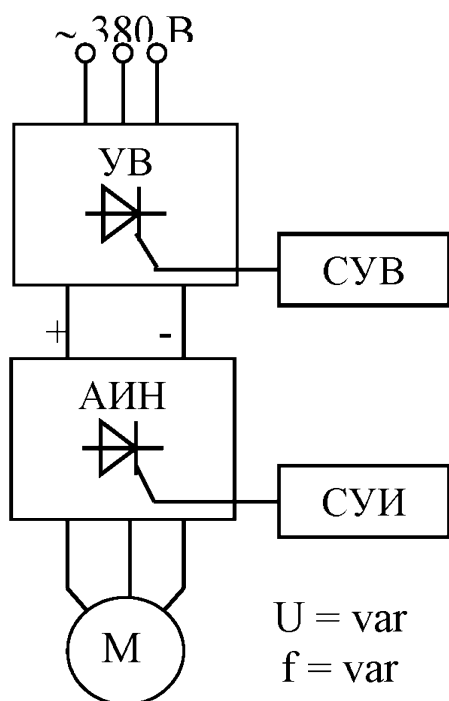


Рис.6.8. Схема системы тиристорный преобразователь частоты – асинхронный двигатель

входят управляемый выпрямитель (УВ) с системой управления выпрямителем (СУВ), а также автономный инвертор напряжения (АИН) с системой управления инвертором (СУИ). Такая система управления двигателем обеспечивает изменение частоты вращения ротора в 2—3 раза при законе управления $U/f = \text{const}$ (здесь U – напряжение, а f – частота тока на выходе преобразователя).

Для сохранения перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на необходимых уровнях следует одновременно с изменением частоты тока f_1 изменять и напряжение питания U_1 в соотношении

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}}, \quad (6.20)$$

где U_1 и M – напряжение и момент нагрузки двигателя при частоте f_1 ;

U'_1 и M' – то же, но при частоте f'_1 .

При регулировании частоты вращения двигателя при условии постоянства момента нагрузки ($M = M' = \text{const}$), подводимое к двигателю напряжение следует изменять в соответствии с выражением

$$U'_1 = U_1 \frac{f'_1}{f_1}. \quad (6.21)$$

В этом случае мощность электродвигателя увеличивается пропорционально нарастанию частоты вращения.

Если регулирование производится по условию постоянства мощности двигателя, то величина подводимого напряжения должна изменяться по формуле

$$U'_1 = U_2 \sqrt{\frac{f'_1}{f_1}}. \quad (6.22)$$

Частотное регулирование позволяет плавно изменять частоту вращения асинхронных электродвигателей в довольно широком диапазоне (12 : 1). Однако тири-

сторные преобразователи частоты имеют высокую стоимость. Поэтому такой способ наиболее эффективен при одновременном регулировании частоты вращения группы двигателей, работающих в одинаковых условиях, например рольганговых двигателей. Частотное регулирование целесообразно также применять для двигателей, размещенных в пожаро- и взрывоопасных зонах, где применение коллекторных двигателей недопустимо.

Расширение области применения регулируемого электропривода на традиционно нерегулируемые установки (насосы, воздуходувки и т. п.) позволяет существенно повысить эффективность использования электроэнергии на промышленных предприятиях.

В качестве иллюстрации на рис.6.9 приведена зависимость мощности на валу агрегата «асинхронный двигатель – центробежный насос» от относительной производительности $Q_* = \frac{Q}{Q_{ном}}$ (здесь Q и $Q_{ном}$ – фактическая и номинальная производительность насоса) при различных напорах, выраженных в долях от максимального:

$H_* = \frac{H}{H_{max}}$ (здесь H и H_{max} – фактический и максимальный напор, создаваемый насосом).

На рис. 6.9 прямая 1 соответствует регулированию производительности задвижкой на напорном трубопроводе при постоянной частоте вращения, кривые – регулированию путем изменения частоты вращения рабочего колеса с помощью регулируемого электропривода. Очевидно, что при применении регулируемого электропривода для обеспечения одной и той же производительности требуется значительно меньшая мощность, чем при регулировании задвижкой.

Регулирование частоты вращения электродвигателя изменением числа пар полюсов обмотки статора осуществляется ступенчато и позволяет получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750, 600 $\frac{1}{мин.}$. Невозможность плавного регулирования частоты вращения двигателей снижает область применения этого способа. Синхронные электродвигатели имеют более высокий КПД по отношению к асинхронным электродвигателям той же мощности.

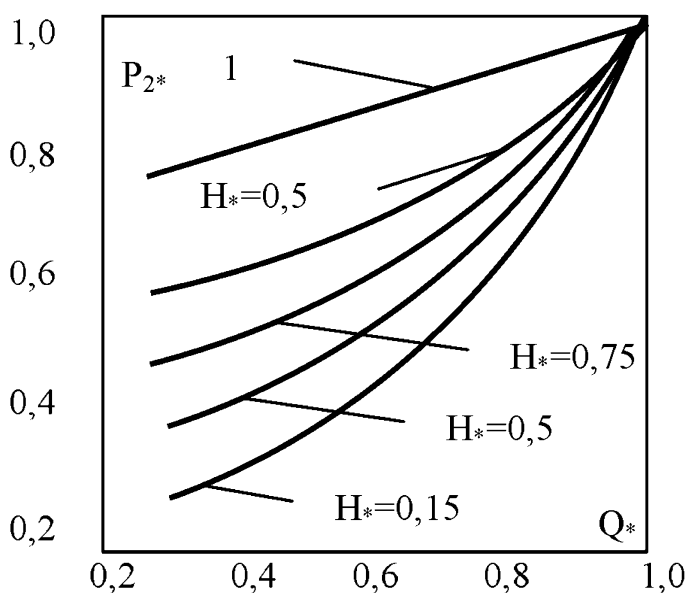


Рис.6.9. Зависимость мощности на валу двигателя от производительности насоса при различном напоре последнего

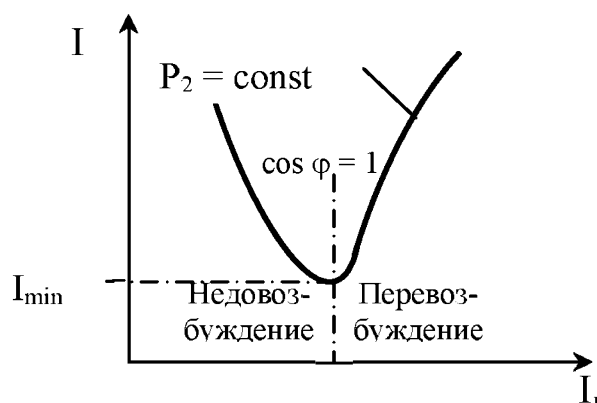


Рис.6.10. Образная характеристика синхронного электродвигателя

Их рекомендуется применять для механизмов и установок длительного режима работы при единичной мощности 100 кВт и более, если это допустимо по условиям электропривода и окружающей среды.

В зависимости от величины тока возбуждения синхронный двигатель может потреблять реактивную мощность (в режиме недовозбуждения), генерировать ее (в режиме перевозбуждения) или работать с $\cos\varphi = 1$. На рис. 6.10 для иллюстрации показана зависимость тока статора I от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при некоторой постоянной нагрузке ($P_2 = \text{const}$) синхронного двигателя. Из приведенной U-образной характеристики видно, что при увеличении тока возбуждения синхронный электродвигатель генерирует реактивную мощность, выполняя свою основную функцию – привод производственного механизма.

При выработке реактивной мощности Q в синхронном двигателе возникают дополнительные потери активной мощности, определяемые по формуле

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_{\text{НОМ}}} Q + \frac{D_2}{Q_{\text{НОМ}}^2} Q^2, \quad (6.23)$$

где D_1 и D_2 – постоянные для каждого двигателя коэффициенты;

$Q_{\text{НОМ}}$ – номинальная реактивная мощность электродвигателя.

Для компенсации реактивной мощности могут применяться синхронные двигатели напряжением 6—10 кВ. Целесообразность использования двигателя в качестве

источника реактивной мощности определяется на основе соответствующих расчетов. С целью поддержания оптимального режима реактивной мощности синхронные двигатели должны иметь устройства автоматического регулирования возбуждения. При этом регулирование возбуждения может вестись в функции тока статора или его активной составляющей, коэффициента мощности двигателя или узла нагрузки, реактивной мощности двигателя, напряжения сети и т. д. Двигатели, не применяемые для компенсации реактивной мощности, должны работать с коэффициентом мощности, близким к единице, что способствует снижению потерь электроэнергии в электрических сетях.

Электродвигатели постоянного тока допускается применять только для механизмов, требующих широкой и плавной регулировки частоты вращения (если частотное регулирование асинхронных двигателей не экономично или не обеспечивает заданный технологический режим), а также для механизмов, интенсивно работающих в поворотно-кратковременных или перемежающихся режимах. Питание электродвигателей постоянного тока может осуществляться по схеме «генератор – двигатель» (Г-Д) (рис. 6.11) или от тиристорных преобразователей (рис.6.12). Более экономичным вариантом является питание двигателей от преобразователей.

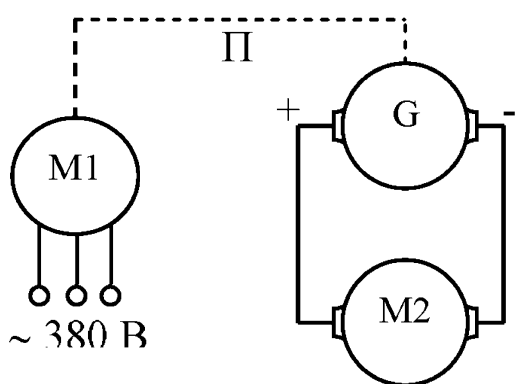


Рис.6.11. Система генератор двигатель: М1 – приводной двигатель; G – генератор постоянного тока; М2 – двигатель постоянного тока; П – механическая передача.

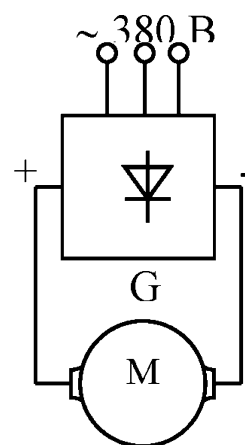


Рис.6.12. Питание электродвигателя от преобразователя: G – преобразователь; М – двигатель постоянного тока.

Приводной механизм присоединяется к электродвигателям с помощью механической передачи. При соединении муфтой КПД передачи 0,98—1. Клиноременная передача имеет КПД 0,95, а плоскоременная – 0,9. Таким образом, от применяемой

передачи зависит величина потерь электроэнергии в системе электропривода. Исключить потери в передаче можно в том случае, когда приводной механизм находится непосредственно на валу электродвигателя.

6.4. Насосные установки

В различных отраслях народного хозяйства для водоснабжения, отопления, водяного охлаждения, пожаротушения, перекачки разнообразных жидкостей широко используются насосы, которые по своему конструктивному исполнению могут быть центробежными, поршневыми и роторными.

Центробежные насосы отличаются большой частотой вращения, относительно малыми габаритами и равномерной подачей жидкости. Вследствие этого они повсеместно применяются для перекачки воды, нефти и нефтепродуктов, кислот, сжиженных газов и т. д.

Поршневые насосы имеют невысокую частоту вращения, относительно большие габариты и массу. Их работа характеризуется пульсирующей подачей жидкости и колебанием давления. Однако они обладают высоким КПД и позволяют достигать значительных напоров даже при небольших подачах. Поршневые насосы находят применение для перекачки разнообразных жидкостей с разной степенью вязкости и чистоты.

Роторные и шестеренчатые насосы используются для перекачки вязких продуктов. Принцип их действия основан на непрерывном вытеснении жидкости шестеренчатым или винтовым поршнем.

Количество электроэнергии, потребляемой насосом, кВт·ч:

$$W = \frac{QH\rho T}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n \eta_p \eta_d}, \quad (6.24)$$

где Q – производительность насоса, м³/ч;

H – полный напор с учетом высоты всасывания, м;

ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

η_n, η_p, η_d – соответственно КПД насоса, передачи и двигателя;

T – время работы насоса, ч.

С учетом того, что в большинстве случаев плотность воды может быть принята постоянной $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, уравнение (3.27) для водяных насосов может быть представлено в следующем виде:

$$W = \frac{2,72 \cdot 10^{-3} QHT}{\eta_n \eta_p \eta_d}. \quad (6.25)$$

Удельный расход электроэнергии для насосной установки определяется как

$$w_y = \frac{W}{QT}. \quad (6.26)$$

Подставив выражение (6.25) в (6.26), получим

$$w_y = \frac{H\rho}{3600 \cdot 102 \eta_n \eta_p \eta_d}. \quad (6.27)$$

Для насосов, перекачивающих воду, удельный расход электроэнергии

$$w_y = \frac{2,72 \cdot 10^{-3} H}{\eta_n \eta_p \eta_d}. \quad (6.28)$$

Анализ выражения (6.28) показывает, что для снижения удельного расхода электроэнергии нужно повышать общий КПД ($\eta_n \eta_p \eta_d$) насосной установки. Увеличение КПД передачи до максимального значения можно достичь, если насос и электродвигатель конструктивно представляют собой одно целое, т. е. рабочее колесо насоса находится на валу электродвигателя.

Общий КПД зависит от конструктивного исполнения и режима работы насоса. На его величину влияют гидравлические, объемные и механические потери. Для насосов низкого напора КПД находится в диапазоне 0,4—0,7, среднего – 0,5—0,7, высокого – 0,6—0,8. У современных насосов КПД достигает 0,9. Поршневые насосы имеют КПД 0,6—0,9.

Для снижения расхода электроэнергии необходимо применять насосы с более высокими значениями КПД. В общем случае величина, на которую уменьшается потребление электроэнергии при замене старого насоса с КПД η_{n1} на новый с КПД η_{n2} ($\eta_{n2} > \eta_{n1}$), определяется по выражению

$$\Delta W = W_1 - W_2, \quad (6.29)$$

где W_1 и W_2 – соответственно расход электроэнергии за рассматриваемый период старым (менее экономичным) и новым насосами.

Снижение величины электропотребления для насоса, перекачивающего воду, при КПД передачи $\eta_{\text{п}} = 1$ может быть найдено по формуле

$$\Delta W = \frac{2,72 \cdot 10^{-3} QHT(\eta_{\text{н}2} - \eta_{\text{н}1})}{\eta_{\text{д}} \eta_{\text{н}1} \eta_{\text{н}2}}. \quad (6.30)$$

Для обеспечения работы электродвигателя с максимальным КПД необходимо, чтобы его мощность была в 1,2—1,25 раза больше мощности, потребляемой насосом.

Повысить эффективность использования насосов можно путем регулирования их производительности в зависимости от нужд потребителей воды или других жидкостей. Регулирование осуществляется с целью изменения величины подачи с помощью напорной или приемной задвижки, путем изменения числа работающих насосов или частоты вращения электродвигателя.

Регулирование задвижкой (дроссельное регулирование) является наиболее простым способом изменения напора. Однако данный способ связан со значительными потерями, что приводит к снижению КПД и увеличению удельного расхода электроэнергии насосной установки. Поэтому дроссельное регулирование применяется только для насосов небольшой мощности, а также при незначительном числе часов регулирования напора в течение года.

При большом расходе жидкости, изменяющемся в течение суток, целесообразна установка нескольких параллельных насосов, включаемых в зависимости от требуемого объема жидкости. Количество работающих насосов подбирается так, чтобы они работали с максимальным КПД.

В системах водоснабжения применяются насосные установки, рассчитанные на максимальное потребление воды при наибольшем напоре. Однако необходимость в максимальном напоре воды, как правило, кратковременна. В связи с этим вне часов максимального расхода воды насосный агрегат работает с большим удельным электропотреблением. Для снижения расхода электроэнергии в системах водоснабжения целесообразно применение накопителя воды, установленного на высоте, обеспечивающей требуемый напор. При заполнении накопителя водой насосный агрегат должен автоматически отключаться. В этом случае расход электроэнергии снижается на величину, определяемую выражением

$$\Delta W = 2,72 \cdot 10^{-3} Q_1 H T' \left(\frac{1}{\eta'_n \eta'_n \eta'_d} - \frac{1}{\eta_n \eta_n \eta_d} \right), \quad (6.31)$$

где Q_1 – расход воды в течение часа;

T' , η'_n , η'_n , η'_d – соответственно время работы, КПД насоса, передачи и электродвигателя при работе без накопителя;

η_n , η_n , η_d – КПД насоса, передачи и электродвигателя при работе с накопителем.

Регулировать подачу насоса можно изменением частоты вращения электродвигателя. В этом случае при снижении расхода воды в системе водоснабжения уменьшается частота вращения двигателя, что приводит к снижению напора, КПД насоса и двигателя. Удельный расход энергии при этом изменяется незначительно. Данный способ целесообразно применять в системах водоснабжения с резко переменным расходом воды.

В трубопроводах может происходить потеря напора вследствие увеличения их сопротивления из-за неоптимальной конфигурации водопроводной сети, неисправности задвижек, неудовлетворительного состояния всасывающих устройств и т. п. Это может быть причиной повышенного удельного электропотребления насосных установок.

Существенное значение для снижения расхода энергоресурсов имеет внедрение на предприятии системы оборотного водоснабжения, а также ликвидация утечек и нерационального использования воды.

Система оборотного водоснабжения обеспечивает многократное использование воды на технологические нужды. Это позволяет сократить расход первичной воды примерно в 2 раза, а электроэнергии – на 15—20 %.

Уменьшить расход воды можно совершенствованием систем охлаждения путем применения автоматического управления подачей воды, устройства последовательного охлаждения отдельных технологических установок, устройства испарительного охлаждения термических установок, применения циркуляционных систем охлаждения сварочных аппаратов и высокочастотных установок, соблюдения установленных значений температуры воды, охлаждающей различные технологические агрегаты и т. п.

Указанные мероприятия позволяют существенно сократить расход воды, а следовательно, и потребление электроэнергии. Достигнутая при этом экономия электроэнергии за некоторый период может быть определена по формуле

$$\Delta W = w_y (Q_1 - Q_2) \cdot T, \quad (6.32)$$

где Q_1 и Q_2 – расход воды до внедрения и после внедрения мероприятия, м³/ч;

T – число часов работы насосной установки в течение рассматриваемого периода.

Пример 6.1. Определить годовое потребление электроэнергии и удельный расход энергии для насоса, перекачивающего бензин, имеющий плотность $\rho = 880$ кг/м³. Производительность насоса $Q = 90$ м³/ч, напор $H = 20$ м, КПД насоса $\eta_n = 0,78$, передачи $\eta_{п} = 0,98$, электродвигателя $\eta_d = 0,88$. Число часов работы насоса в году $T = 4000$ ч.

Решение. Количество потребляемой за год электроэнергии определим по формуле (6.24)

$$W = \frac{90 \cdot 20 \cdot 880 \cdot 4000}{3600 \cdot 102 \cdot 0,78 \cdot 0,98 \cdot 0,88} = 25651,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Удельный расход электроэнергии по соотношению (6.26)

$$w_y = \frac{25651,3}{90 \cdot 4000} = 0,071 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3.$$

Пример 6.2. Определить, на сколько снизится расход электроэнергии за рабочую смену продолжительностью $T = 8$ ч при замене насоса подачи воды, имеющего КПД $\eta_{н1} = 0,6$, на более экономичный насос, у которого КПД $\eta_{н2} = 0,8$. Производительность насоса $Q = 160$ м³/ч, напор $H = 30$ м. Насос приводится в действие электродвигателем, работающим с КПД $\eta_d = 0,9$.

Решение. Величина снижения расхода электроэнергии рассчитывается по выражению (6.30)

$$\Delta W = \frac{2,72 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 30 \cdot 8(0,8 - 0,6)}{0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8} = 48,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

6.5. Вентиляционные установки

На промышленных предприятиях вентиляторы широко применяются в разнообразных технологических установках. Они также используются как техническое средство для обеспечения необходимых санитарно-гигиенических условий в помещениях, зданиях, подземных сооружениях и т. п.

В цехах промышленных предприятий могут применяться следующие виды вентиляции: вытяжная – для удаления пыли, газа и других компонентов, загрязняющих воздух; приточная – для подвода свежего воздуха и охлаждения помещения; отопительно-циркуляционная; тепловые завесы – на входах в отапливаемое здание; технологическая – воздуходувки.

Вентиляционные установки, обеспечивающие жизнедеятельность и безопасность людей, должны работать весьма надежно. Это часто является причиной завышения производительности вентиляционных установок и поддержания режимов их работы, не всегда способствующих минимизации расхода энергоресурсов.

Расход электроэнергии, кВт·ч, вентилятором определяется по формуле

$$W = \frac{h \cdot Q \cdot \tau}{\eta} \cdot 10^{-3}, \quad (6.33)$$

где h – развиваемое вентилятором давление, Па;

Q – производительность (подача) вентилятора, м³/с;

τ – время работы вентилятора, ч;

η – КПД вентиляционной установки.

Сократить расход энергоресурсов на вентиляцию можно различными способами. В первую очередь необходимо применять современные вентиляторы с улучшенными аэродинамическими свойствами, без механических передач, со значениями КПД в диапазоне 0,65–0,9. У старых типов вентиляторов КПД не превышает 0,6. Поэтому замена вентиляторов старых типов новыми, с более высокими значениями КПД, приводит к экономии электроэнергии, величина которой в кВт·ч определяется по формуле

$$\Delta W = \frac{hQ(\eta_2 - \eta_1) \cdot \tau \cdot 10^{-3}}{\eta_1 \eta_2}. \quad (6.34)$$

Для снижения потерь электроэнергии необходимо стремиться к тому, чтобы вентилятор и его двигатель работали с максимальными значениями КПД. С этой целью тип вентилятора выбирают по необходимому расходу воздуха и давлению, определяемому сопротивлением системы воздуховодов. Замена вентиляторов старых типов более экономичными позволяет снизить расход электроэнергии на 25—35 %.

Для улучшения удельных показателей электропотребления следует регулировать производительность вентиляторов. Широкое распространение на практике получило регулирование подачи воздуха с помощью шиберов (задвижек). При этом более эффективным является регулирование подачи на всасывающей патрубке, обеспечивающее некоторую экономию электроэнергии.

Наиболее прогрессивным способом регулирования производительности вентиляторов является изменение частоты вращения электродвигателей. Это изменение можно производить ступенчато с помощью многоскоростных двигателей или плавно, если питание асинхронного двигателя осуществляется от частотного преобразователя. Применение регулирования частоты вращения двигателя целесообразно, если имеет место длительная работа вентилятора с пониженной производительностью. При этом необходимо учитывать ухудшение КПД многоскоростного двигателя, а также потери электроэнергии в преобразователе частоты асинхронного электропривода.

Экономия электроэнергии при использовании многоскоростных электродвигателей вместо регулирования шиберами достигает 20—30%. При использовании двухскоростного электродвигателя экономия электроэнергии в кВт·ч определяется по формуле

$$\Delta W = \left[\frac{h_1 Q_1 (\eta_1 - \eta_0) \tau_1}{\eta_1 \eta_0} + \frac{(h_1 Q_1 \eta_0 - h_2 Q_2 \eta_2) \tau_2}{\eta_2 \eta_0} \right] \cdot 10^{-3}, \quad (6.35)$$

где h_1 и h_2 – давление вентилятора до и после изменения режима, Па;

Q_1 и Q_2 – подача вентилятора до и после изменения режима работы, м³/с;

η_0 – КПД односкоростного вентилятора;

η_1 и η_2 – КПД двухскоростного вентилятора соответственно на первой и второй частотах вращения;

τ_1 и τ_2 – время работы вентилятора с большой и малой производительностью, ч.

Значительную экономию электроэнергии (до 50 %) дает применение для вентиляторов частотно-регулируемого электропривода. Однако высокая стоимость преобразователей частоты является серьезным препятствием на пути широкого внедрения этого способа регулирования производительности вентиляционных установок.

С гораздо меньшими затратами можно регулировать производительность вентилятора путем изменения угла установки лопаток на рабочем колесе.

Снижение электропотребления вентиляционными установками в значительной степени определяется автоматическим управлением в зависимости от режима работы производственного основного оборудования.

Отключение части вентиляторов во время обеденных перерывов и пересмен, когда не производятся работы, может дать значительную экономию (до 20 %) потребляемой электроэнергии. Автоматическое регулирование и управление вентиляционными установками в зависимости от температуры охлаждаемых машин, узлов или наружного воздуха экономит электроэнергию до 10—15 %.

Для осуществления процесса сжигания необходим воздух, подача которого под определенным давлением производится с помощью вентиляторов и воздуходувок. Эффективная работа огнетехнического агрегата возможна при подаче воздуха в количестве, необходимом для полного сгорания топлива (газа, мазута, кокса). Это обеспечивается поддержанием требуемого давления в питающем воздухопроводе путем автоматического управления работающими на агрегате воздуходувками.

Существенное значение для снижения расхода электроэнергии имеет применение блокировки вентиляторов тепловых завес с устройством открывания и закрывания ворот. Блокировка выполняется с целью воздействия на электропривод вентиляторов тепловых завес при срабатывании механизма открывания и закрывания дверей. При открывании дверей автоматически включается вентилятор подачи теплого воздуха, а при закрывании – отключается. Это позволяет экономить до 70 % потребляемой электроэнергии.

В тех случаях, когда рабочие места находятся вблизи дверей, для электропривода тепловых завес следует применять двухскоростные двигатели. При открывании дверей двигатель автоматически включается на высшую скорость, а после закрывания – переключается на низшую, обеспечивая необходимый температурный режим в

помещении. При работе на низшей скорости мощность электродвигателя уменьшается в два раза, что приводит к снижению потребления электроэнергии.

Пример 6.3. Определить, на сколько снизится расход электроэнергии за рабочую смену продолжительностью 8 ч при замене вентилятора, имеющего производительность $Q = 43 \text{ м}^3/\text{с}$, а давление $h = 440 \text{ Па}$ и КПД $\eta_1 = 0,6$, на вентилятор с теми же характеристиками, но с КПД $\eta_2 = 0,84$.

Решение. По формуле (3.37) определим снижение расхода электроэнергии за смену

$$\Delta W = \frac{440 \cdot 43(0,84 - 0,6) \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 0,84} = 72,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

6.6. Производство сжатого воздуха

Сжатый воздух применяется для привода пневматических инструментов и оборудования (различного рода молотов, вибраторов, отбойных молотков и т. п.), пневмотранспорта, пневмоавтоматики, обеспечения работы воздушных высоковольтных выключателей, продувки и прочистки деталей, оборудования, труб и т. д. Пневматические инструменты и оборудование просты по конструкции, удобны в эксплуатации, отличаются малой массой и высокой надежностью, однако имеют низкий КПД. Например, КПД пневматического ручного инструмента, широко применяемого при выполнении клепальных, шлифовальных, сверлильных и других работ, составляет всего 2,5—11 %. По этой причине сжатый воздух в качестве энергоносителя используется лишь тогда, когда это требуется по условиям технологии и техники безопасности.

Для получения сжатого воздуха на небольших и средних предприятиях, как правило, применяются поршневые компрессоры, а на крупных – центробежные. Процесс сжатия воздуха является весьма энергоемким. Вследствие этого расход электроэнергии на привод компрессоров на многих машиностроительных предприятиях достигает 30 %, а на некоторых угольных шахтах – 70 % общего объема потребляемой электроэнергии. В Республике Беларусь компрессорные установки промышленных предприятий в 1994 г. израсходовали порядка 3 млрд. кВт · ч, что со-

ставило примерно 8,5 % общего электропотребления страны. Потенциальные возможности энергосбережения при выработке сжатого воздуха оцениваются достаточно высоко – до 50 % потребляемой компрессорными установками энергии.

Для того чтобы выявить возможные пути снижения расхода энергоресурсов, рассмотрим укрупненно процесс производства сжатого воздуха.

В систему снабжения предприятия сжатым воздухом входит компрессорная станция (установка), распределительные нагнетательные трубопроводы и запорная арматура (рис. 6.13). Компрессорная станция состоит из непосредственно компрессоров, приводных электродвигателей и вспомогательного оборудования.

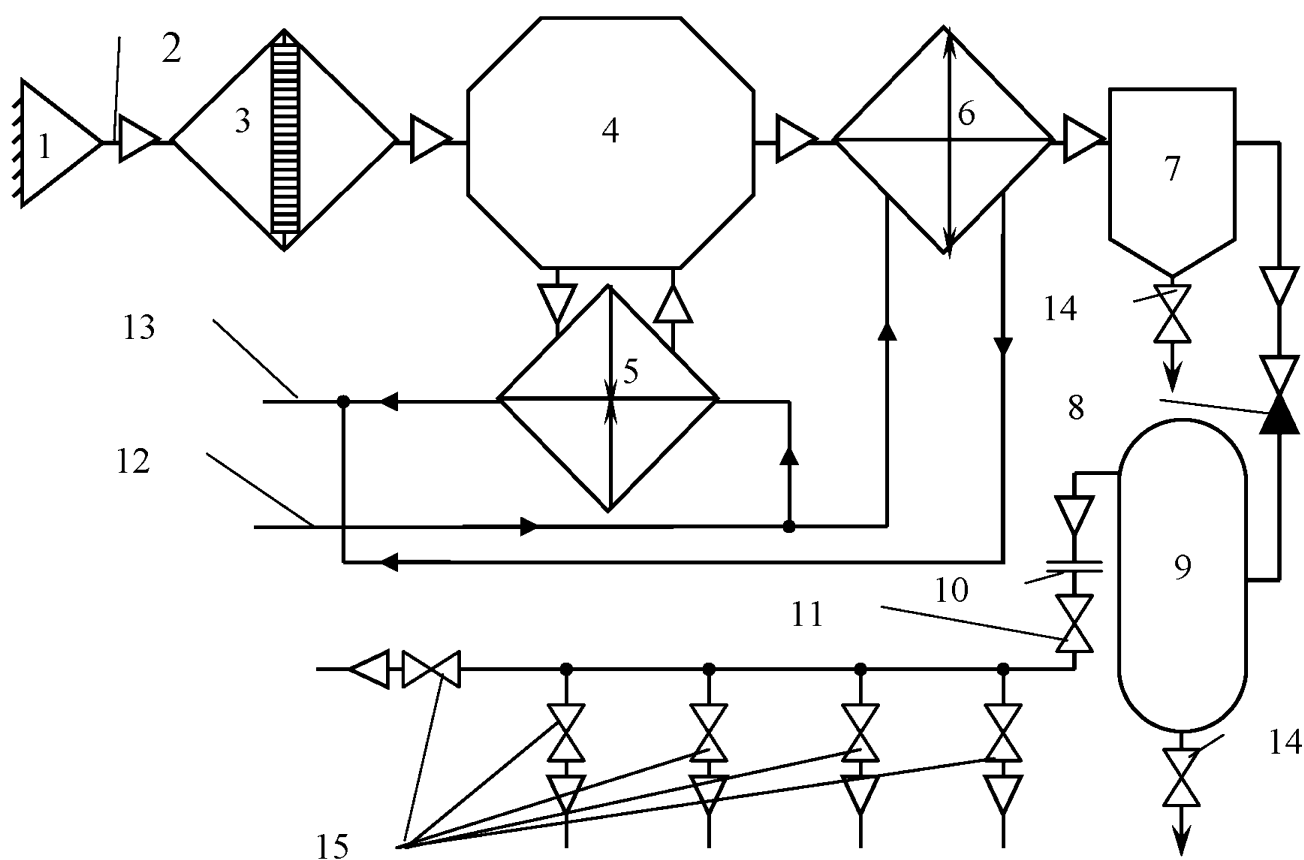


Рис.6.13. Вариант принципиальной схемы компрессорной установки и воздушной сети предприятия: 1 – заборное устройство атмосферного воздуха; 2 – трубопровод для воздуха; 3 – воздушный фильтр; 4 – компрессор; 5 – промежуточный охладитель воздуха; 6 – конечный охладитель воздуха; 7 – маслоуловитель; 8 – обратный клапан; 9 - ресивер; 10 – измерительная диафрагма; 11 – запорный вентиль участков воздушной сети; 12, 13 – соответственно подающий и отводящий трубопроводы охлаждающей воды системы оборотного водоснабжения; 14 – дренаж; 15 – вентили потребителей сжатого воздуха.

Воздух, всасываемый в цилиндр компрессора, должен быть очищен от пыли и механических примесей с помощью специальных фильтров. С целью очистки возду-

ха от капель масла уже после компрессора в схему компрессорной включают маслоотделители.

Характер процесса сжатия и, следовательно, затраты энергии на его проведение, производительность компрессора в большой степени зависят от температуры всасываемого в цилиндры воздуха. Рассмотрим влияние этого фактора, связанного также и с безопасностью эксплуатации компрессорной.

Сжатие протекает в области, ограниченной двумя возможными предельными процессами: адиабатным сжатием, когда цилиндр компрессора не охлаждается, и изотермическим, когда интенсивное охлаждение цилиндра компрессора обеспечивает постоянство температуры сжимаемого воздуха. С точки зрения энергозатрат, чем ближе процесс сжатия к изотермическому, тем лучше, что объясняет наличие, в ряде случаев, рубашки охлаждения на цилиндрах компрессора. Тем не менее, в реальных компрессорах интенсивность процесса охлаждения цилиндра не обеспечивает изотермического сжатия, температура воздуха увеличивается достаточно резко и, если не принять дополнительных мероприятий, достигает температуры вспышки масла, необходимого для смазки трущихся частей компрессора. Таким мероприятием является промежуточное охлаждение воздуха в специальных теплообменниках. Для его осуществления процесс сжатия прерывается, воздух охлаждается в теплообменнике и затем направляется в следующую ступень сжатия. Такое многоступенчатое сжатие и охлаждение обеспечивает, кроме безопасности, приближение процесса к изотермическому и, следовательно, к снижению энергозатрат. Воздух также охлаждается и после выхода из компрессора в концевом охладителе, что вызвано вопросами охраны труда (горячий воздух небезопасно подавать потребителю), и кроме всего, транспорт охлажденного воздуха сопровождается меньшими потерями энергии.

Изложенное выше объясняет наличие развитой системы водяного охлаждения на компрессорных станциях. Оно же обуславливает необходимость принятия всех возможных мер по снижению температуры воздуха на всей системе его генерации. Вопрос усугубляется и прямо пропорциональной зависимостью расхода всасываемого в компрессор воздуха от температуры и давления.

При расположении всасывающего устройства на солнечной стороне под действием прямых солнечных лучей температура подаваемого в компрессор воздуха по-

вышается. Для снижения температуры всасываемого воздуха, а следовательно, и расхода энергии необходимо располагать всасывающее устройство с теневой стороны, а также теплоизолировать трубопроводы, если они проходят по жарким помещениям. В ряде случаев может оказаться целесообразным производить искусственное охлаждение каким-либо способом всасываемого воздуха перед подачей его в цилиндр компрессора. Полученный в компрессоре сжатый воздух пропускается через воздухоохладитель и маслоотделитель и поступает в воздухохранилище, к которому присоединяется воздушная распределительная сеть, питающая разнообразные пневмоприемники.

Расход электроэнергии на производство сжатого воздуха может быть выражен следующей формулой:

$$W = W_{\text{к}} + W_{\text{в}} + W_{\text{сн2}} \quad (6.36)$$

где $W_{\text{к}}$, $W_{\text{в}}$ и $W_{\text{сн}}$ – соответственно расход электроэнергии на привод компрессоров, насосов подачи охлаждающей воды и на собственные нужды компрессорной станции (вентиляцию, освещение и т. д.).

В общем расходе энергии наибольшее значение имеет составляющая расхода на электропривод компрессоров.

Основным технико-экономическим показателем работы компрессоров является удельный расход электроэнергии. При отсутствии данных, полученных в результате испытаний, для охлаждаемых компрессоров удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м³, можно определить по формуле

$$w_{\text{у}} = \frac{l_{\text{из}}}{3600\eta_{\text{из}}\eta_{\text{д}}\eta_{\text{п}}}, \quad (6.37)$$

где $l_{\text{из}}$ – изотермическая удельная работа компрессора, кДж/м³;

$\eta_{\text{из}}$, $\eta_{\text{д}}$, $\eta_{\text{п}}$ – КПД соответственно изотермический компрессора, электродвигателя, механической передачи от электродвигателя к компрессору.

Изотермическая работа компрессора, затрачиваемая на сжатие воздуха с объемным расходом V_1 м³/час (объемный расход определен при параметрах всасывания) от давления во всасывающем патрубке p_1 до конечного давления p_2 , вычисляется по выражению

$$L'_{из} = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right), \text{ кДж/час.} \quad (6.38)$$

Отметим, что в выражении (6.38) значения давления должны быть заданы в кПа.

Для пересчета объема при нормальных условиях, который чаще всего приведен в характеристиках оборудования, к объему при условиях всасывания можно использовать соотношение

$$V_1 = V_H \left(\frac{p_H}{p_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_H} \right), \quad (6.39)$$

где V_H – объем воздуха при нормальных условиях ($p_H = 760$ мм рт. ст. = 101,33 кПа; $T_H = 273$ К);

p_1 – давление перед цилиндрами компрессора, выраженное в тех же единицах, что и p_H ;

T_1 , К – температура воздуха перед цилиндром компрессора.

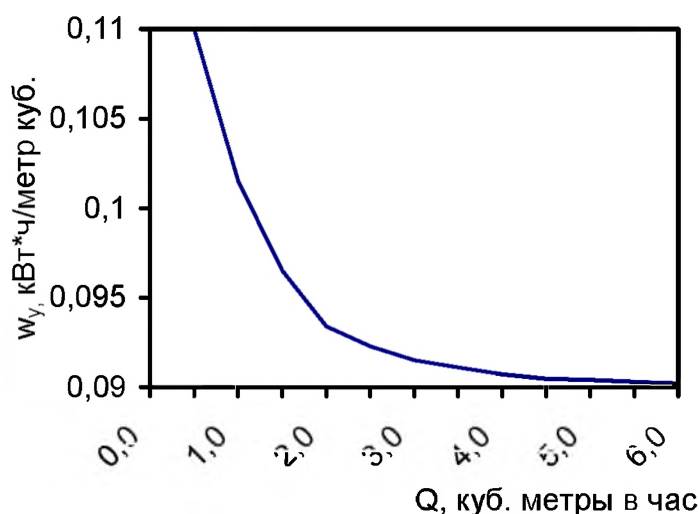


Рис.6.14. Зависимость удельного расхода электроэнергии на привод поршневого компрессора от производительности

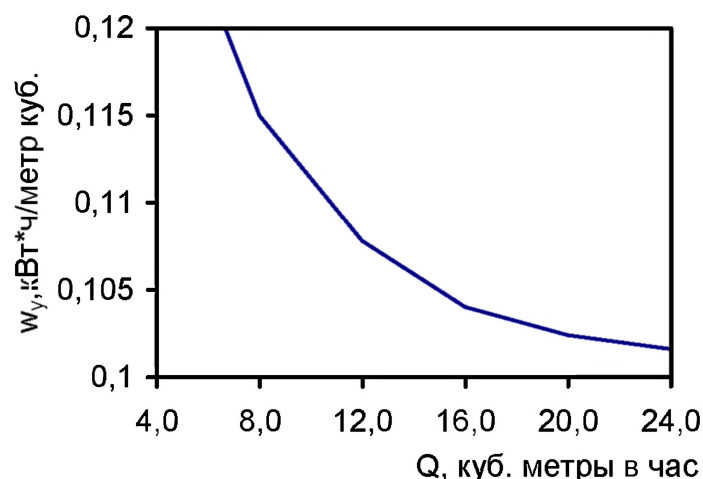


Рис.6.15. Зависимость удельного расхода электроэнергии на привод центробежного компрессора от производительности

Зависимость среднего удельного расхода электроэнергии от производительности Q при давлении сжатия 0,784 МПа и полной нагрузке компрессоров приведена на рис. 6.14 и 6.15.

Как видно из представленных зависимостей, с увеличением производительности компрессора A удельный расход электроэнергии w_y снижается, что объясняется повышением КПД приводного электродвигателя с увеличением его мощности на валу. Отметим также, что более экономичными являются поршневые компрессоры.

При проектировании компрессорных станций следует предусматривать установку компрессоров с возможно меньшим удельным расходом энергии. Число компрессоров принимается минимальным, но с учетом обеспечения технологического резервирования в случае ремонта одной из установок.

Рассмотрим основные пути снижения расхода электроэнергии на производство сжатого воздуха.

В первую очередь необходимо осуществлять рациональное распределение нагрузок между компрессорами с учетом их технико-экономических характеристик. При снижении расхода сжатого воздуха следует производить отключение одного или нескольких компрессоров. Если на компрессорной станции параллельно работают компрессоры разных типов, то регулирование подачи сжатого воздуха должно производиться путем отключения машины с более низким КПД. При установке однотипных компрессоров их отключение осуществляется по циклической схеме. В этом случае достигается относительно равномерная загрузка и нагрев компрессоров и приводных электродвигателей, что уменьшает расход электроэнергии за счет повышения КПД установок и некоторого снижения расхода охлаждающей воды.

На эффективность работы компрессорных установок оказывает влияние состояние воздушных фильтров. При нерегулярной очистке воздушных металлических фильтров их сопротивление возрастает, снижается давление всасываемого в цилиндр воздуха, что приводит к снижению подачи (производительности) компрессоров и увеличению расхода электроэнергии. В зимнее время при отрицательной температуре фильтры обмерзают, что существенно уменьшает проходное сечение, снижает подачу компрессоров и вызывает перерасход электроэнергии.

Если на фильтрах отсутствуют всасывающие камеры, то они должны быть защищены от попадания воды специальным металлическим козырьком. Фильтры следует очищать от пыли и грязи через 300—600 часов работы. Процесс очистки металлических фильтров весьма трудоемок. Поэтому эффективным является приме-

ние самоочищающихся масляных фильтров, которые имеют практически постоянное сопротивление в течение длительного периода эксплуатации.

Важную роль в работе компрессоров играют всасывающие клапаны, которые могут быть кольцевыми или прямоточными. Более эффективными являются прямоточные клапаны. Замена кольцевых клапанов на прямоточные снижает удельный расход электроэнергии на 10—12 % и увеличивает подачу компрессора на 6—8 %. При этом увеличивается длительность межремонтного периода, так как срок службы прямоточных клапанов 8000, а кольцевых – 3000 часов.

Повысить производительность поршневых компрессоров можно путем внедрения резонансного наддува, суть которого заключается в следующем. Во всасывающем трубопроводе из-за пульсации давления возникает волновое движение воздуха с чередованием гребней и впадин давления. Если правильно настроить всасывающий трубопровод на резонанс, то можно улучшить условия всасывания воздуха. Резонансный наддув обеспечивается применением всасывающего трубопровода определенной (резонансной) длины, численное значение которой может быть найдено расчетным путем. При использовании резонансного наддува подача поршневого компрессора увеличивается на 10 % без повышения электропотребления.

Всасывающие трубопроводы промышленных компрессоров, как правило, имеют длину в диапазоне 0,6—0,8 расчетной резонансной длины, что не обеспечивает минимальный расход электроэнергии. Удлинение всасывающего трубопровода до фактической резонансной длины, определяемой опытным путем, позволяет сократить удельный расход электроэнергии на 5—8 %.

Снижение расхода электроэнергии может быть осуществлено за счет сокращения утечек сжатого воздуха, возникающих из-за неплотностей соединительных элементов, запорной и предохранительной арматуры, повреждений трубопроводов, шлангов и т. п. Потери электроэнергии, вызванные утечками сжатого воздуха, ориентировочно могут быть рассчитаны по выражению

$$\Delta W = w_y q n t, \quad (6.40)$$

где w_y – удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха, кВт · ч/м³;

q – расход воздуха через неплотности, м³/мин;

n – количество точек, где имеются утечки сжатого воздуха, шт.;

τ -- время, в течение которого воздухопровод находится под давлением, мин.

Величина расхода воздуха через неплотности в арматуре и шлангах в зависимости от эквивалентного диаметра отверстия и давления в трубопроводе определяется приближенно по специальным таблицам или кривым, например по табл. 6.1.

Таблица 6.1

Расход воздуха через неплотности в арматуре и шлангах

Эквивалентный диаметр отверстия, мм	Расход воздуха (м ³ /мин) при давлении, МПа				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6
2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
4	0,45	0,6	0,75	0,9	1,0
6	1,0	1,3	1,9	2,0	2,3
8	1,7	2,4	3,0	3,6	4,1
10	2,7	3,7	4,6	5,5	6,4
12	4,0	5,3	6,7	8,1	9,3

Существенное снижение расхода электроэнергии дает применение сжатого воздуха пониженного давления, используемого для многих технологических процессов (с учетом номинальных давлений пневмоприемников). С этой целью может применяться система сжатого воздуха двух давлений, что является весьма эффективным решением. При наличии на предприятии системы сжатого воздуха одного давления целесообразно применять у потребителей регуляторы давления. Снижение давления сжатого воздуха на 1 % снижает перерасход сжатого воздуха и, следовательно, расход электроэнергии на 0,5 %.

Производительность пневматических машин, инструментов и оборудования зависит от расхода, давления и температуры воздуха. Давление и объемный расход воздуха определяется характеристиками пневмооборудования. С повышением температуры воздуха перед пневмодвигателями рост удельной работы l опережает снижение массового расхода Q . В результате работа

$$L = l \cdot Q. \tag{6.41}$$

В конечном итоге снижение массового расхода воздуха уменьшает затраты энергии на привод компрессоров.

Подогрев воздуха на 30—50 °С позволяет сэкономить до 10 % потребляемой электроэнергии.

Также приводит к снижению расхода электроэнергии на выработку сжатого воздуха применение теплоизоляции воздухопроводов. Ощутимую экономию электроэнергии на промышленных предприятиях дает использование вместо сжатого воздуха других энергоносителей. Например, замена в литейных цехах пескоструйных установок очистки литья с пневмоприводом на дробеструйные с электроприводом уменьшает расход электроэнергии в 3 раза, использование электроинструмента вместо пневмоинструмента дает экономию электроэнергии в среднем на 7—10 %.

Недопустимо нерациональное использование сжатого воздуха, например, вместо вентиляторного дутья для увеличения тяги дымовых труб и вентиляционных систем, охлаждения крупных подшипников и электродвигателей, сушки оборудования и т. п.

Для привода компрессоров при единичной мощности 100 кВт и более рекомендуется применять синхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ и 6—10 кВ. При меньшей единичной мощности могут использоваться асинхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ.

Частота вращения поршневых компрессоров большой мощности не превышает 500 1/мин., а малой – от 1000 до 1500 1/мин.

В процессе эксплуатации компрессора возникает необходимость регулирования его подачи. Для этого в компрессорах или на воздухопроводах устанавливаются регулирующие устройства. Значительные возможности для регулирования подачи заключены в применении регулируемого электропривода.

Основными путями повышения эффективности эксплуатации электроприводов у компрессоров являются:

- 1) выбор рационального режима работы асинхронных двигателей (оптимальной загрузки двигателей с учетом уровня напряжения в электрической сети);
- 2) выбор оптимальных законов регулирования тока возбуждения синхронных двигателей, обеспечивающих минимум суммарных потерь энергии в двигателях и питающей сети;
- 3) применение регулируемого электропривода.

Рациональная эксплуатация электропривода компрессоров способствует улучшению показателей электропотребления промышленных объектов.

В заключение отметим, что в энергосбережении важную роль играет автоматизация производственных процессов. В частности, автоматизация компрессорных станций сжатого воздуха снижает расход электроэнергии примерно на 10 %.

Пример 6.4. Определить удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха для компрессора типа 4ВМ10-100/8, имеющего следующие технические характеристики: производительность $100 \text{ м}^3/\text{мин.}$, абсолютное давление всасывания $p_1 = 98 \text{ кПа}$, нагнетания – 880 кПа . Изотермический КПД компрессора $\eta_{\text{из}} = 0,7$. Компрессор приводится в действие синхронным двигателем напряжением 6 кВ типа СДК2-11-26-12КУЧ, который имеет номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 630 \text{ кВт}$. КПД двигателя $\eta_{\text{д}} = 0,94$, передачи $\eta_{\text{п}} = 0,97$.

Решение. Вычислим изотермическую работу компрессора

$$l_{\text{из}} = 98 \cdot 1 \cdot \ln\left(\frac{880}{98}\right) = 215,1 \text{ кДж/м}^3.$$

Удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха

$$W_{\text{у}} = \frac{215,1}{3600 \cdot 0,7 \cdot 0,94 \cdot 0,97} = 0,094 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3.$$

Пример 6.5. Определить потери электроэнергии в течение суток из-за утечки сжатого воздуха через отверстие диаметром 4 мм в трубопроводе при рабочем давлении $0,55 \text{ МПа}$. Удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха $w_{\text{у}} = 0,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$.

Решение. По табл. 3.1 для давления $0,55 \text{ МПа}$ методом линейной интерполяции находим расход сжатого воздуха за 1 минуту через отверстие диаметром 4 мм $Q = 0,825 \text{ м}^3/\text{мин.}$

Потери электроэнергии за счет утечки сжатого воздуха в течение суток определяются по выражению (3.10)

$$\Delta W = 0,1 \cdot 0,825 \cdot 1 \cdot 24 \cdot 60 = 118,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

6.7. Электросварочные установки

Электросварка представляет собой достаточно энергоемкий технологический процесс, обеспечивающий создание неразъемного соединения металлических деталей. На некоторых машиностроительных заводах расход электроэнергии на электросварку может достигать 25 – 35 % общего электропотребления. В связи с этим рациональное использование электроэнергии является одной из важнейших задач в сварочном производстве.

Существуют два основных вида электросварки:

- 1) сварка плавлением (дуговая электросварка);
- 2) сварка давлением (контактная электросварка).

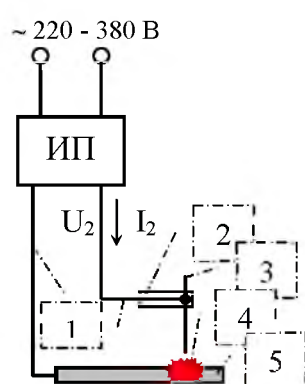


Рис. 6.16. Принципиальная схема дуговой электросварки; ИП – источник питания; 1 – проводники; 2 – электрододержатель; 3 – электрод; 4 – электрическая дуга; 5 – свариваемая деталь.

Дуговая электросварка, производимая за счет теплоты, выделяемой электрической дугой, может выполняться вручную, полуавтоматически и автоматически. Принципиальная схема дуговой электросварки показана на рис. 6.16.

При сварке может быть три варианта использования электрической дуги:

1) открытая дуга, горящая в воздухе, парах металла и компонентах покрытия электрода (применяется в основном при ручной сварке);

2) закрытая дуга, горящая под флюсом в парах металла и флюса (применяется при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом);

3) защищенная дуга, горящая в защитных газах: аргоне, гелии, двуокиси углерода и др. (используется как при ручной, так и при автоматической сварке).

На рис. 6.17 (кривая 1) показана вольт-амперная характеристика дугового разряда (зависимость напряжения U от тока I) при постоянной длине дуги, горящей в воздухе.

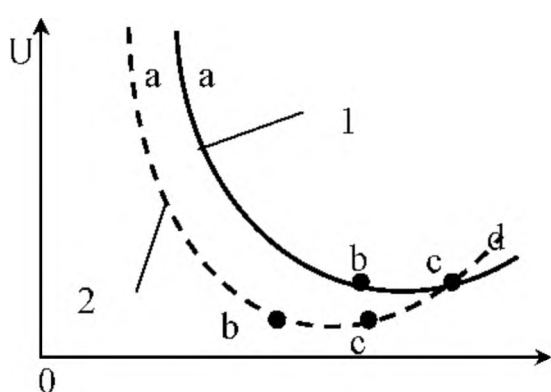


Рис.6.17.Вольт-амперные характеристики дуги: 1 – при использовании открытых электродов; 2 – при использовании электродов с покрытием и флюсом

В общем случае характеристика имеет три участка: падающий (участок а—в) при малых значениях тока, жесткий (участок в—с), т. е. независящий от тока, и возрастающий (участок с—d) при больших значениях тока. При покрытии электродов, применяемых при ручной сварке, специальными веществами, и также использовании флюсов, при автоматической и полуавтоматической сварке дуга имеет возрастающую характеристику при значительно меньших токах (кривая 2, рис. 6.17). В покрытиях электродов и флюсах содержатся элементы с малыми потенциалами ионизации, что способствует устойчивому горению дуги, особенно при переменном токе. При сварке покрытие расплавляется и образующийся шлак и газы защищают расплавленный металл от воздуха.

Форма и рабочий участок вольт-амперной характеристики дугового разряда при применяемом способе сварки, кроме тока, определяется также составом газовой атмосферы, материалом электродов, их размерами и т. д. При ручной сварке, как правило, используется падающий или жесткий участок, при автоматической под флюсом — жесткий или возрастающий, при автоматической или полуавтоматической сварке в защитных газах — возрастающий.

Каждый источник питания сварочной дуги характеризуется номинальной мощностью, диапазоном регулирования сварочного тока I_2 , напряжением холостого хода $U_{2х}$, обеспечивающим зажигание дуги, КПД, коэффициентом мощности, продолжительностью включения и внешней характеристикой (зависимостью напряжения от сварочного тока). На рис. 6.18 показаны возможные внешние характеристики источников питания. Для устойчивого горения дуги необходимо, чтобы форма внешней характеристики источника питания соответствовала форме характеристики дуги. При этом внешняя характеристика источника питания должна быть такой, чтобы

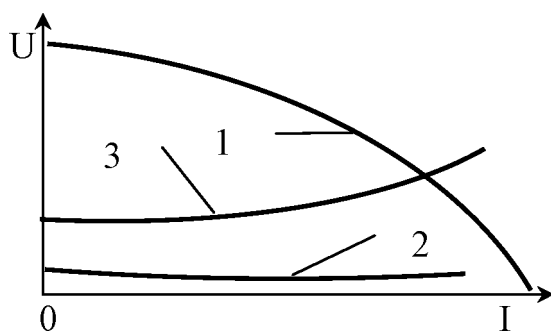


Рис.6.18. Внешние характеристики источников питания: 1 – падающая; 2 – жесткая; 3 - возрастающая.

при изменении длины дуги ток находился в допустимых пределах.

Электросварка может производиться как на постоянном, так и на переменном токе. При использовании переменного тока наиболее простыми и экономичными источниками питания являются сва-

рочные трансформаторы. Справочные трансформаторы выпускаются однофазными с двумя обмотками. Они преобразуют напряжение сети 220 или 380 В в напряжение 60—80 В, необходимое для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги.

Специфической особенностью сварочного трансформатора является прерывистый режим его работы, так как для зажигания дуги создается преднамеренное короткое замыкание вторичной цепи трансформатора, а обрыв дуги приводит к режиму холостого хода. Для ограничения тока в сварочной цепи увеличивают индуктивное сопротивление трансформатора. С этой целью повышают магнитное рассеяние путем размещения первичной и вторичных обмоток на разных стержнях магнитопровода. Кроме того, во вторичную цепь трансформатора последовательно включается дроссель (реактивная обмотка из медного провода, размещенная на стальном магнитопроводе).

Конструктивно дроссель может выполняться отдельно (рис. 6.19а) или совмещенным с трансформатором (рис. 6.19б). При однокорпусном исполнении сварочных трансформаторов уменьшается расход стали, повышаются КПД и коэффициент мощности.

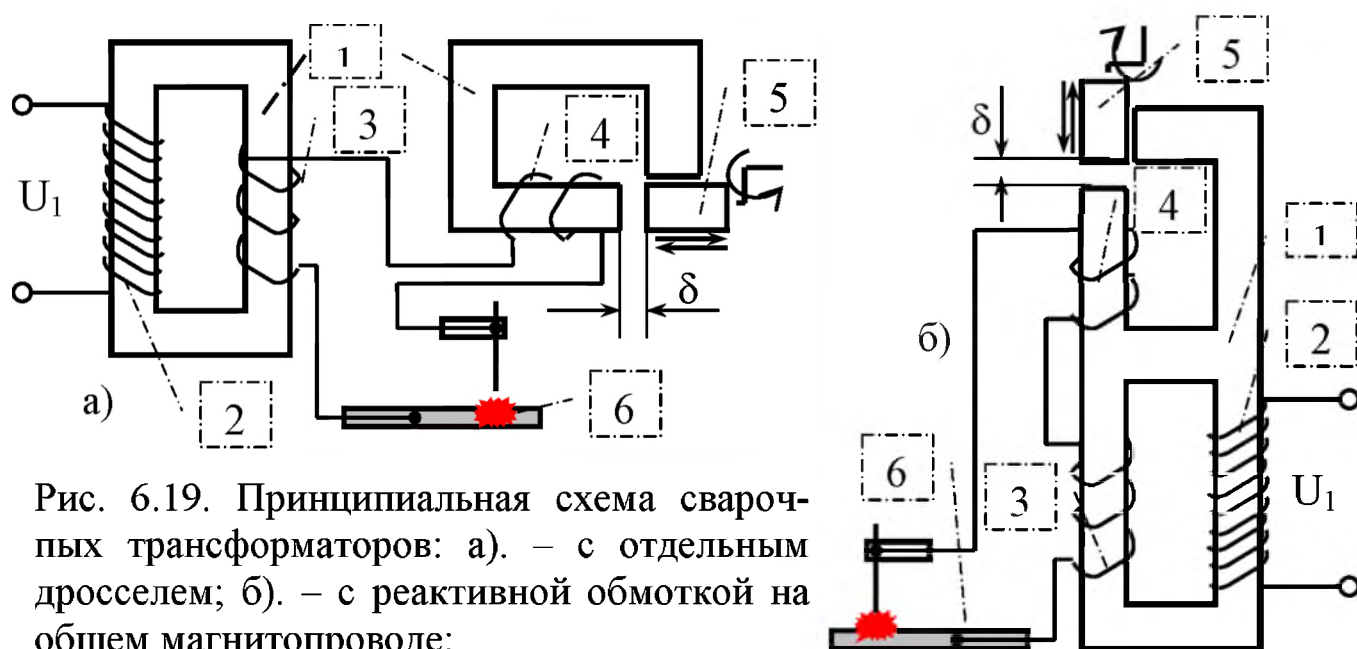


Рис. 6.19. Принципиальная схема сварочных трансформаторов: а). – с отдельным дросселем; б). – с реактивной обмоткой на общем магнитопроводе;

1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – реактивная обмотка; 5 – подвижная часть дросселя; 6 – свариваемая деталь.

Дроссель может иметь механическое регулировочное устройство, позволяющее плавно изменять воздушный зазор δ в магнитопроводе в диапазоне от минимального

($\delta_{\min} \approx 0$) до максимального значения (δ_{\max}). При минимальной величине зазора δ_{\min} дроссель имеет наибольшее индуктивное сопротивление, так как в этом случае магнитный поток, воздействующий на обмотку, и ЭДС самоиндукции максимальны. Следовательно, сварочный ток имеет наименьшее значение $I_{2\min}$. Максимальному значению зазора соответствует наименьшее индуктивное сопротивление дросселя и максимальный сварочный ток $I_{2\max}$.

Повышенное индуктивное сопротивление обмоток и наличие дросселя обеспечивают трансформатору падающие внешние характеристики $U_2 = f(I_2)$, необходимые для устойчивого горения дуги. Наличие регулируемого воздушного зазора δ в дросселе дает возможность плавно изменять угол наклона внешних характеристик. Рабочий ток сварочного трансформатора I_2 соответствует напряжению электрической дуги $U_d \approx 30$ В. Внешние характеристики сварочного трансформатора даны на рис. 6.20.

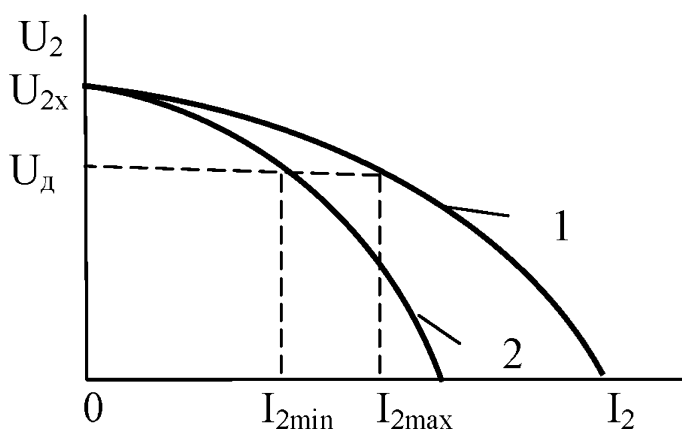


Рис.6.20. Внешние характеристики трансформатора для дуговой электросварки: 1,2 –при воздушном зазоре соответственно максимальном и минимальном

Отметим, что из-за повышенного индуктивного сопротивления сварочные трансформаторы потребляют значительное количество реактивной мощности и имеют невысокое среднее значение коэффициента мощности ($\cos \varphi = 0,4-0,5$).

Если необходимо на одном электроде выделить большое количество теплоты (например при сварке толстых деталей или наплавке металла), для электросварки применяют постоянный ток, который обеспечивает более устойчивое горение дуги. При этом в качестве источников питания применяются вращающиеся электромашинные преобразователи и сварочные выпрямители.

Преобразователь состоит из асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и сварочного генератора постоянного тока, смонтированных в одном корпусе. В зависимости от типов генераторы могут иметь падающие или жесткие внешние характеристики.

Сварочный выпрямитель состоит из трансформатора с устройством для регулирования тока и выпрямительного блока, собранного по трехфазной мостовой схеме. Принципиальные схемы трансформаторов аналогичны ранее рассмотренным. Однако, как правило, трансформаторы имеют трехфазное исполнение. По сравнению с электромашинными преобразователями сварочные выпрямители являются более простыми и надежными источниками питания. Их КПД также несколько выше, чем преобразователей. Для дуговой сварки могут применяться автоматы с плавящимся или неплавящимся электродом, одно- или многоэлектродные, для сварки в защитных газах или под флюсом, сварочные тракторы, самоходные сварочные головки и т. д.

Автоматы обеспечивают автоматическое зажигание дуги, поддержание требуемого режима сварки, подачу электродной и присадочной проволоки, перемещение автомата, сварочной головки или изделия, подачу флюса или защитного газа и окончание процесса сварки. Все это делает качество сварки более высоким.

Имеются также аппараты для электрошлаковой сварки, которые классифицируются по способу перемещения вдоль свариваемого шва:

- 1) рельсовые автоматы, перемещающиеся по вертикальным рельсам, которые устанавливаются параллельно шву;

- 2) автоматы, перемещающиеся непосредственно по свариваемому изделию.

Контактная электросварка производится при помощи теплоты, выделяемой током при прохождении его через кромки изделия. Сварка завершается сдавливанием свариваемых кромок. Контактная сварка может быть стыковой, точечной и роликовой (шовной).

При стыковой сварке детали свариваются по всей плоскости касания (рис. 6.21а). Различают два вида стыковой сварки: сопротивлением и оплавлением. В первом случае концы плотно сжатых деталей нагреваются током без оплавления, а затем пластически деформируются и свариваются. Во втором — свариваемые детали медленно сближаются до соприкосновения (при включенном трансформаторе), но без сдавливания. В месте соприкосновения создается контакт с большим сопротивлением, где при протекании сварочного тока выделяется большое количество тепло-

ты и происходит оплавление металла. После некоторого прогрева детали сдавливаются осевой силой F . Металл деформируется и сваривается.

При точечной сварке сваривание деталей производится по поверхности касания в отдельных точках (рис. 6.21б).

При роликовой сварке (рис. 6.21в) соединение деталей непрерывным или прерывистым швом осуществляется вследствие прохождения через них тока, подводимого через вращающиеся ролики.

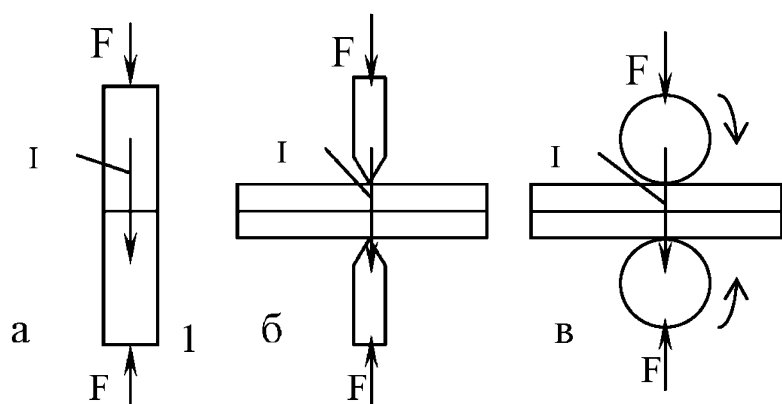


Рис.6.21. Основные виды контактной сварки: а – стыковая; б – точечная; в - роликовая.

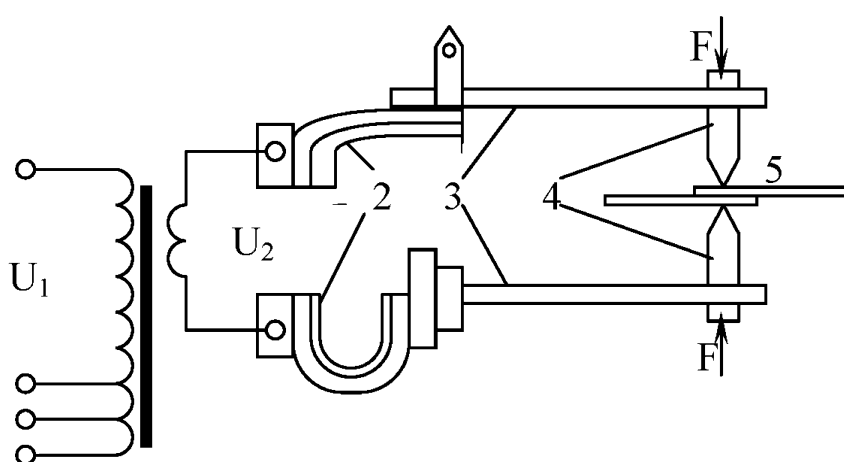


Рис.6.22. Принципиальная схема установки контактной сварки: 1 – трансформатор; 2 – гибкая часть сети; 3 – шинопровод; 4 – зажимные электроды; 5 – свариваемые детали.

Принципиальные схемы установок различных видов контактной сварки практически одинаковы. Рассмотрим схему, показанную на рис. 6.22. Секционированная первичная обмотка сварочного трансформатора 1 подключается к сети напряжением 380 В. Жесткий шинопровод 3 из медного проката с одного конца соединяется с помощью гибкого токопровода 2, состоящего из медной фольги или гибких проводов, со вторичной обмоткой трансформатора, а с другого — с медными зажимными электродами 4 или роликами. Размеры и конструкция вторичного контура определяются технологическими возможностями и энергетическими показателями сварочной установки.

Контактная сварка осуществляется импульсным током, достигающим десятков кА. Длительность импульса варьируется в диапазоне от долей секунды до нескольких секунд. Для предотвращения недопустимого перегрева вторичные витки транс-

форматора могут охлаждаться водой. Управление установкой производится с помощью контактора.

Основными показателями, характеризующими работу установок электросварки, являются КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Значение КПД установки дуговой электросварки определяется из выражения

$$\eta_{\text{и}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ип}}}, \quad (6.42)$$

где $P_{\text{п}}$ – полезная мощность, затрачиваемая установкой на сварку;

$P_{\text{ип}}$ – мощность источника питания.

Полезная мощность сварочной установки

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ип}} - \Delta P, \quad (6.43)$$

где ΔP – потери мощности, обусловленные нагревом различных узлов сварочной аппаратуры и приспособлений, теплообменом с окружающей средой, уносом теплоты с нагретыми газами и т. д.

Установки дуговой сварки покрытыми электродами на постоянном токе имеют КПД 0,75–0,85, на переменном – 0,65–0,75, дуговой электросварки под флюсом – 0,8–0,9, в аргоне плавящимся электродом – 0,7–0,75, дуговой сварки угольным электродом – 0,5–0,6, электрошлаковой – 0,6–0,9.

Значение $\cos \varphi$ для установок дуговой электросварки в основном определяется типом источника питания и состоянием сварочной цепи вторичного напряжения. Установки дуговой электросварки переменного тока имеют $\cos \varphi$ в пределах 0,3–0,5, сварочные выпрямители – 0,5–0,9, электромашинные преобразователи – 0,7–0,9.

Коэффициент полезного действия машин контактной сварки определяется по формуле

$$\eta_{\text{м}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{1\text{св}}} = \frac{R_{\text{св}}}{R_1'' + R_2 + R_{\text{св}}}, \quad (6.44)$$

где $P_{\text{п}}$ – полезная мощность, затрачиваемая машиной непосредственно на сварку;

$P_{1\text{св}}$ – активная мощность, потребляемая сварочной машины из сети; $R_{\text{св}}$ – общее активное сопротивление свариваемого участка; R_1'' – активное сопротивление первичной обмотки сварочного трансформатора, приведенное к вторичному напряже-

нию; R_2 – активное сопротивление сварочного контура машины, (включая вторичную обмотку трансформатора).

Значение коэффициента мощности сварочной машины

$$\cos \varphi_m = \frac{R_1'' + R_2 + R_{св}}{\sqrt{(R_1'' + R_2 + R_{св})^2 + (x_1'' + x_2)^2}}, \quad (6.45)$$

где x_1'' – приведенное к вторичной стороне индуктивное сопротивление первичной обмотки сварочного трансформатора; x_2 – индуктивное сопротивление сварочного контура машины.

Как правило, КПД сварочных машин меньше 0,5. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) универсальных сварочных машин находится в пределах 0,3–0,4, шовных – 0,4–0,6, точечных – 0,6–0,7. Причем с увеличением толщины свариваемых деталей значения КПД и коэффициента мощности заметно понижаются.

Для стыковых сварочных машин значения КПД и $\cos \varphi$ на разных стадиях сварки существенно различаются. Наименьшие значения эти коэффициенты имеют на стадиях подогрева и осадки ($\eta_m = 0,15–0,35$, $\cos \varphi = 0,4–0,5$), максимальные – в период оплавления ($\eta_m = 0,75–0,95$, $\cos \varphi = 0,7–0,85$).

Увеличить значения η_m и $\cos \varphi$ сварочных машин можно путем уменьшения активного R_2 и индуктивного x_2 сопротивлений сварочного контура. Для этого необходимо периодически контролировать сопротивление сварочного контура, так как в процессе эксплуатации контактные соединения могут ослабляться и загрязняться, применять для электросварки ток пониженной частоты или постоянный ток, а также продольно-емкостную компенсацию сварочной сети.

Продольно-емкостная компенсация заключается в последовательном включении перед сварочным трансформатором конденсаторов, имеющих емкостное сопротивление $x_c = x_2$. Ее применение снижает потери мощности в сварочных установках в 1,5–3 раза.

Потребляемую дуговой сварочной установкой электроэнергию за технологический процесс сварки (кВт·ч/кг) можно определить по выражению

$$W_n = \frac{U_2 \cos \varphi}{K_p \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (6.46)$$

где U_2 – вторичное напряжение сварки, В; $\cos\varphi$ – среднее значение коэффициента мощности сварочной установки; K_p – коэффициент расплавления, $\frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$.

Коэффициент расплавления зависит от материала электрода, состава его покрытия, а также от рода и полярности тока. Для стальных электродов значение этого коэффициента находится в диапазоне $(7-20) \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$.

Потребление электроэнергии машинами контактной сварки, кВт · ч, приближенно можно найти по формуле

$$W_H = I_2^2 R_M \tau_{\text{св}} \cdot 10^3, \quad (6.47)$$

где I_2 – вторичный сварочный ток, кА; $\tau_{\text{св}}$ – время сварки, ч;

R_M – суммарное сопротивление сварочной машины, Ом, определяемое как

$$R_M = R_T + R_{2к} + R_{\text{св}}, \quad (6.48)$$

где R_T , $R_{2к}$, $R_{\text{св}}$ – соответственно активное сопротивление сварочного трансформатора, вторичного контура сварочной машины и свариваемого участка.

Значения R_T , $R_{2к}$ и R_M содержатся в каталогах сварочных машин. В условиях эксплуатации I_2 , R_M и $\tau_{\text{св}}$ определяются путем замеров.

В табл. 6.2 приведены примерные значения удельных расходов электроэнергии на 1 кг наплавленного металла при различных видах дуговой электросварки. При этом для постоянного тока указаны расходы энергии при использовании электромашинных преобразователей. Если в качестве источника питания применяются выпрямители, то удельные расходы снижаются за счет более высокого КПД выпрямителей и уменьшения потребляемой мощности при холостом ходе.

Таблица 6.2

Удельный расход электроэнергии при дуговой сварке

№ п/п	Род тока и вид электросварки	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг
1	Переменный ток	
1.1	Ручная сварка	2,65–3,8
1.2	Автоматическая и полуавтоматическая под флюсом	2,8–3,5
1.3	Электрошлаковая сварка	1,8–2,4
2	Постоянный ток	
2.1	Ручная однопостовая сварка	5,0–6,5

2.2	Ручная многопостовая сварка	8,0–9,0
2.3	Автоматическая и полуавтоматическая под флюсом	4,2–6,0
2.4	Автоматическая и полуавтоматическая в защитной среде газообразного диоксида углерода	2,2–3,2

Удельные расходы электроэнергии при различных видах контактной электро-сварки отражает табл. 6.3.

Таблица 6.3

Удельный расход электроэнергии при контактной сварке

Стыковая сварка оплавлением		Точечная электросварка		Роликовая электросварка	
Площадь поперечного сечения в месте сварки, мм ²	Расход электроэнергии на сварку одного стыка, кВт·ч	Суммарная толщина свариваемых листов, мм	Расход электроэнергии на 100 точек, кВт·ч	Суммарная толщина свариваемых листов, мм	Расход электроэнергии на 1 м шва, кВт·ч
100	0,006	2	0,04	0,5	0,04–0,08
200	0,025	4	0,08	1,0	0,08–0,14
300	0,06	6	0,13	1,5	0,1–0,2
500	0,125	8	0,23	2,0	0,12–0,24
1000	0,4	10	0,38	3,0	0,25–0,5
1500	0,825	12	0,62	4,0	0,5–1,0
2000	1,275	-	-	-	-
2500	1,725	-	-	-	-

Рассмотрим основные способы экономии электроэнергии в сварочных установках.

В первую очередь необходимо выбрать наиболее целесообразный способ электросварки. Снизить удельный расход электроэнергии можно за счет перевода сварки с постоянного тока на переменный. Наименее эффективной является ручная электросварка на постоянном токе. Поэтому замена ее на полуавтоматическую сварку в среде углекислого газа снижает удельный расход электроэнергии примерно в 2–2,5 раза, а на шовную контактную сварку – в 1,2 раза.

Применение вместо ручной дуговой электросварки на переменном токе автоматической сварки под флюсом экономит 5–7 % электроэнергии, а при использовании вместо ручной сварки электрошлаковой удельный расход электроэнергии снижается в 1,5 – 2 раза. Существенно уменьшает расход электроэнергии внедрение многоточечных сварочных машин вместо однотоочечных.

Следует рационально использовать стыковые машины контактной сварки, так как они имеют примерно в 2–2,5 раза больший расход электроэнергии по сравнению с шовной электросваркой.

Правильный выбор источников питания и своевременная замена изношенного сварочного оборудования может дать существенную экономию электроэнергии. Внедрение многопостовых установок на переменном токе вместо однопостовых сварочных установок позволяет снизить расход электроэнергии на электросварку примерно на 13–25 %.

Существенное значение для экономии энергоресурсов имеет правильный выбор электродов для дуговой электросварки. Использование электродов с покрытием, в котором содержится железный порошок, существенно увеличивает сварочный ток, повышает производительность труда и снижает удельный расход электроэнергии. Применение рутиловых (рутил – двуокись титана) электродов повышает качество сварки, ускоряет его процесс и снижает расход электроэнергии примерно на 10 %.

Для рационального использования электроэнергии при точечной, многоточечной и шовной сварке необходимо поддерживать нормальное состояние вторичных контуров сварочных машин, а также обеспечивать оптимальный режим сварки.

Сварку изделий можно производить на мягком (пониженный ток, но большее время сварки) и жестком (повышенный ток, но меньшее время сварки) режимах. При использовании жесткого режима сварки расход электроэнергии в зависимости от толщины свариваемого металла снижается в 1,1–4,8 раза.

Внедрение устройств для автоматического ограничения холостого хода сварочных трансформаторов или преобразователей позволяет уменьшить или полностью исключить потери электроэнергии при перерывах в сварке, а также повысить коэффициент использования сварочных агрегатов. Промышленностью выпускаются автоматические устройства для отключения сварочного трансформатора в режиме холостого хода.

Пример 6.6. Определить удельный расход электроэнергии для дуговой сварочной установки переменного тока. Сварка производится через трансформатор, имеющий вторичное сварочное напряжения $U_2 = 50$ В, $\cos\varphi = 0,5$, КПД $\eta_{и} = 0,7$. Для

сварки применяются электроды с коэффициентом расплавления $K_p = 15 \cdot 10^{-3}$ кг/(А · ч).

Решение. Удельный расход электроэнергии определяется

$$W_n = \frac{50 \cdot 0,5}{0,015 \cdot 0,7} \cdot 10^{-3} = 2,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг}.$$

6.8. Электрическое освещение

В Республике Беларусь на электрическое освещение расходуется около 10—13 % от общего потребления электроэнергии. В 1994 году общий расход электроэнергии на освещение составил порядка 4 млрд. кВт · ч, из которого 29 % приходится на промышленные предприятия, 26 % — жилые дома, 20 % — административные и общественные здания, 12 % — уличное освещение, 8 % — сельское хозяйство, 5 % — прочие объекты. На промышленных предприятиях расход электроэнергии на освещение составляет в среднем 5—15 % от общего электропотребления. Дорожники могут улучшить ситуацию с уличным освещением городов и поселков введением в состав асфальтобетона осветляющих добавок. К таковым относятся “дорсил”, природный кварц, высокопрочный известняк и пр.

Задачей оптимального проектирования и рациональной эксплуатации осветительных установок является обеспечение с наименьшими затратами требуемой освещенности и необходимого качества освещения помещений и рабочих мест с целью создания нормальных условий для жизнедеятельности людей. Экономить электроэнергию за счет ухудшения освещенности и качества освещения недопустимо, так как это может повлечь за собой нежелательные последствия: снижение производительности труда, увеличение зрительной нагрузки работающих, повышение травматизма и т. п.

Для электрического освещения могут использоваться лампы накаливания и разрядные лампы (люминесцентные низкого давления, дуговые ртутные высокого давления, металлогалогенные, натриевые и ксеноновые). Некоторые технические характеристики ламп общего назначения приведены в табл. 6.4.

Важнейшим показателем экономичности электрических ламп является световая отдача, которая повышается с увеличением номинальной мощности для всех типов ламп. К концу срока службы световой поток ламп снижается, что приводит к уменьшению световой отдачи.

Как следует из табл. 6.4, наименее экономичными источниками света являются лампы накаливания. Однако они широко применяются для освещения жилых, общественных и производственных зданий, что объясняется рядом их достоинств (малые затраты на оборудование осветительных установок вследствие непосредственного подключения ламп к сети, стабильные показатели качества в течение срока службы, удобство обращения и обслуживания, высокие гигиенические свойства и т. д.).

Таблица 6.4

Технические характеристики ламп общего назначения

Тип ламп (источника света)	Номинальная мощность, Вт	Средняя продолжительность горения, ч	Световая отдача, лм/Вт
Лампа накаливания	15—1000	1000	10—20
Люминесцентные низкого давления	7—80	6000—15000	35—80
Дуговые ртутные лампы типа ДРЛ	250—1000	12000—20000	40—60
Металлогалогенные типа ДРИ	125—3500	3000—10000	55—100
Натриевые высокого давления типа Днат	70—400	6000—15000	80—125
Ксеноновые трубчатые лампы	2000—50000	100—800	20—45

Люминесцентные лампы низкого давления применяются для освещения помещений общественных и жилых зданий, а также низких помещений (не выше 6—8 м) производственных зданий.

Серия энергоэкономичных люминесцентных ламп мощностью 18, 36 и 58 Вт предназначена для общего и местного освещения помещений производственных, общественных и административных зданий (лампы типа ЛБ и ЛДЦ), а также жилых помещений (лампы типа ЛЕЦ). Эти лампы при одной и той же освещенности потребляют на 7—8 % меньше электроэнергии по сравнению с обычными люминесцентными лампами мощностью 20, 40 и 65 Вт.

Газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ и ДРИ используются для освещения помещений высотой 6—20 м, а также для наружного освещения.

Натриевые лампы типа ДнаТ вследствие высокой пульсации их светового потока и специфического спектра оптического излучения, имеющего выраженную желто-оранжевую составляющую, для внутреннего освещения на промышленных предприятиях применяются ограниченно, в основном в сочетании с лампами типа ДРЛ или ДРИ. Основная область использования натриевых ламп – освещение территорий промышленных объектов, автострад, улиц, площадей, а также больших открытых пространств.

Ксеноновые лампы предназначены для освещения больших открытых пространств (карьеров, мостов, погрузочно-разгрузочных площадок, территорий сортировочных железнодорожных станций), архитектурных сооружений и т. д.

В целях экономии энергоресурсов в осветительных устройствах следует преимущественно использовать газоразрядные лампы. При замене ламп накаливания на люминесцентные лампы низкого давления расход электроэнергии снижается на 55 %, на лампы типа ДРЛ – на 40 %, на лампы типа ДРИ – на 65 %. При этом в обоснованных случаях следует отдавать предпочтение разрядным лампам большей единичной мощности при соблюдении необходимого качества освещения.

Для прямой замены ламп накаливания выпускаются компактные люминесцентные лампы типа КЛС мощностью 9, 13, 18 и 25 Вт. Лампа КЛС выполняется в виде пластмассового корпуса, оснащенного резьбовым цоколем, и состыкованного с ним светорассеивающего колпака. Внутри корпуса находится источник люминесцентного излучения, пускорегулирующий аппарат (ПРА), а также стартер с конденсатором. Применение вместо ламп накаливания ламп типа КЛС позволяет сэкономить до 70 % электроэнергии.

Существенное снижение (до 40 %) затрат электроэнергии на освещение территорий предприятий, улиц, дорог и площадей дает применение вместо ламп типа ДРЛ натриевых ламп высокого давления.

Величина потребляемой за год осветительными установками электроэнергии определяется по формуле

$$W_0 = K_{co} K_{ПРА} P_{ном} T_{мо}, \quad (6.49)$$

где K_{co} – коэффициент спроса для осветительной нагрузки, $K_{co} = 0,6—1,0$;

$K_{\text{ПРА}}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в пускорегулирующих аппаратах газоразрядных ламп, $K_{\text{ПРА}} = 1,1—1,2$;

$P_{\text{ном}}$ – установленная мощность освещения;

$T_{\text{мо}}$ – годовое число часов использования максимума осветительной нагрузки.

Для экономии энергоресурсов в первую очередь необходимо правильно выбрать тип применяемых электрических ламп, преобразующих электроэнергию в оптическое излучение.

Экономия электроэнергии за счет замены ламп с установленной мощностью $P_{\text{ном1}}$ на более эффективные лампы с установленной мощностью $P_{\text{ном2}}$, обеспечивающие требуемое качество освещения, определяется по формуле

$$\Delta W_0 = K_{\text{со}}(K_{\text{ПРА1}} P_{\text{ном1}} - K_{\text{ПРА2}} P_{\text{ном2}}) T_{\text{мо}}, \quad (6.50)$$

где $K_{\text{ПРА1}}$ и $K_{\text{ПРА2}}$ – коэффициенты, учитывающие потери в ПРА соответствующих ламп.

Для достижения рационального расхода электроэнергии на освещение необходимо правильно выбрать систему освещения, тип, число и мощность ламп, типы применяемых светильников, а также оптимально разместить их в помещениях.

В процессе эксплуатации в светильниках следует применять лампы, предусмотренные в проектах и соответствующие нормам освещенности. Завышение установленной мощности осветительных приборов приводит к неоправданному перерасходу электроэнергии, определяемому по выражению

$$\Delta W_0 = K_{\text{со}} K_{\text{ПРА}} (P_{\text{фо}} - P_{\text{по}}) T_{\text{мо}}, \quad (6.51)$$

где $P_{\text{фо}}$ – фактическая мощность ламп;

$P_{\text{по}}$ – установленная мощность ламп, предусмотренная проектом или необходимая для обеспечения нормативной освещенности.

Относительная экономия (или перерасход) электроэнергии, получаемая при использовании вместо одного источника света (1) другого (2), может быть определена по выражению

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{K_{\text{ПРА2}} E_2 C_2 K_{32} H_1}{K_{\text{ПРА1}} E_1 C_1 K_{31} H_2} \right) \cdot 100\%, \quad (6.52)$$

где E_1 и E_2 – нормируемые уровни освещенности для осветительных установок с источниками света 1 и 2;

C_1 и C_2 – отношение минимальной расчетной освещенности к нормированной для источников света 1 и 2 ($0,9 \leq C \leq 1,2$);

K_{31} и K_{32} – коэффициенты запаса в осветительных установках с источниками света 1 и 2 (для ламп накаливания $K_3 = 1,3—1,7$; для люминесцентных ламп $K_3 = 1,5—2$);

H_1 и H_2 – световая отдача источников света 1 и 2.

Положительное значение ΔW % соответствует экономии, отрицательное – перерасходу электроэнергии.

При одинаковых значениях расчетных коэффициентов и уровня освещенности выражение (6.52) приобретает вид

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right) \cdot 100\% . \quad (6.53)$$

Снизить расход электроэнергии можно применением энергоэкономичных ПРА. Внедрение электронных ПРА снижает потери в пускорегулирующих аппаратах примерно на 20 %. Однако высокая стоимость электронных ПРА сдерживает их широкое внедрение в осветительных установках.

Для экономии электроэнергии большое значение имеет правильная эксплуатация осветительных установок. В процессе работы осветительные приборы загрязняются, что ухудшает освещенность помещений, а лампы снижают световую отдачу. Поэтому на предприятиях должны быть планы и графики осмотров, чисток светильников и замены изношенных ламп. Четкое и своевременное выполнение указанных мероприятий позволяет уменьшить число включаемых ламп и тем самым снизить расход электроэнергии. Для люминесцентных ламп целесообразно применять групповой способ замены, при котором они заменяются по истечении примерно 80 % средней продолжительности горения, даже если лампы сохраняют работоспособность. Это способствует поддержанию требуемого уровня освещенности, особенно в помещениях со сложными зрительными работами. Исправные демонтированные лампы могут использоваться во вспомогательных помещениях.

Групповой способ замены эффективен лишь для относительно дешевых источников света, какими являются люминесцентные лампы низкого давления. Лампы

типа ДРЛ или ДРИ вследствие их большой стоимости целесообразно заменять индивидуальным способом.

В процессе эксплуатации осветительных установок могут выходить из строя конденсаторы компенсированных ПРА. Это приводит к снижению коэффициента мощности осветительных приборов, увеличению тока нагрузки и, следовательно, потерь электроэнергии в электрических сетях. Поэтому необходимо осуществлять регулярный контроль токовых нагрузок осветительных установок и при необходимости производить замену отказавших конденсаторов.

В осветительных установках должны предусматриваться рациональная система управления освещением. В крупных цехах целесообразно применять дистанционное управление искусственным освещением, позволяющее своевременно включать и отключать осветительные установки в начале и конце работы, а также в зависимости от уровня естественной освещенности на рабочих местах. Для автоматического управления внутренним и наружным освещением служат фотореле, фотоавтоматы, фотоэлектрические программные устройства, реле времени с приводом от часового механизма. Внедрение автоматического управления осветительными установками снижает расход электроэнергии на 5—15 %.

Сокращение продолжительности включения ламп достигается улучшением использования естественного освещения. Для этого могут применяться системы управления осветительными установками, обеспечивающие отключение рядов светильников, расположенных параллельно окнам, в зависимости от уровня естественной освещенности. Снизить время использования установок искусственного освещения в помещениях зданий, имеющих большую площадь остекления, можно путем регулярного (не менее двух раз в год) мытья стекол, что приводит к экономии электроэнергии до 3 %.

Благоприятно влияет на использование осветительных установок окраска стен, потолков и производственного оборудования в светлые тона. Одним из условий рационального расходования электроэнергии является поддержание уровней напряжения в осветительной сети в допустимых пределах ($0,95U_{\text{НОМ}} - 1,05U_{\text{НОМ}}$). При повышенном напряжении имеет место перерасход электроэнергии. Снижение напряже-

ния на 1 % уменьшает световой поток ламп накаливания на 3—4 %, люминесцентных низкого давления – на 1,5 %, типа ДРЛ – на 2,2 %.

Весьма чувствительны к колебаниям и отклонениям напряжения натриевые и ксеноновые лампы. Например, при отклонении напряжения в осветительной сети от номинального значения на $\pm 5\%$ потребляемая мощность ксеноновой лампы изменяется на $\pm 20\%$.

Для обеспечения требуемых уровней напряжения в осветительных установках применяют устройства автоматического регулирования напряжения, например тиристорные ограничители напряжения.

Пример 6.7. Определить годовую экономию электроэнергии в результате замены лампы накаливания мощностью 40 Вт со световым потоком 430 лм на компактную люминесцентную лампу мощностью 9 Вт, имеющую световой поток 425 лм. Годовое число часов использования осветительной нагрузки $T_{\text{мо}} = 2100$ ч. Коэффициент, учитывающий потери в ПРА люминесцентной лампы, $K_{\text{ПРА}} = 1,2$.

Решение. Величина, на которую снизятся потери электроэнергии, определяется по выражению (6.50)

$$\Delta W_0 = 1 \cdot (0,04 - 1,2 \cdot 0,009) \cdot 2100 = 61,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Пример 6.8. Оценить относительную экономию электроэнергии при использовании для освещения цеха люминесцентных ламп типа ЛБ40-1 со световой отдачей $H_2 = 80$ лм/Вт по сравнению с лампами накаливания типа Б215-225-200 со световой отдачей $H_1 = 15,7$ лм/Вт. Нормируемая освещенность цеха $E = 300$ лк, отношение минимальной освещенности к нормируемой для люминесцентных ламп $C_2 = 1,1$, для ламп накаливания $C_1 = 1,15$. Коэффициент запаса для люминесцентных ламп $K_{32} = 1,75$, для ламп накаливания $K_{31} = 1,5$. Коэффициент, учитывающий потери в ПРА люминесцентных ламп, $K_{\text{ПРА}2} = 1,2$. Для ламп накаливания $K_{\text{ПРА}1} = 1$.

Решение. Относительную экономию электроэнергии можно найти по формуле (6.52)

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{1,2 \cdot 300 \cdot 1,1 \cdot 1,75 \cdot 15,7}{1,0 \cdot 300 \cdot 1,15 \cdot 1,5 \cdot 80} \right) \cdot 100 = 73,7 \%$$

Таким образом, при использовании люминесцентных ламп экономия электроэнергии составит 73,7 %.

Пример 6.9. Определить относительное снижение расхода электроэнергии наружной осветительной установкой при использовании в ней вместо газоразрядных ламп типа ДРЛ-250 со световой отдачей $H_1 = 54$ лм/Вт натриевых ламп типа Днат-150, имеющих световую отдачу $H_1 = 100$ лм/Вт. Для обоих вариантов осветительной установки $E = 2$ лк, расчетные коэффициенты $K_3 = 1,5$; $C = 0,95$, $K_{\text{ПРА1}} = 1,1$.

Решение. Так как для рассматриваемых вариантов осветительной установки нормируемая освещенность и расчетные коэффициенты имеют одинаковые значения, то относительное снижение расхода электроэнергии вычислим по выражению (6.53)

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{54}{100}\right) \cdot 100 = 46\%.$$

Следовательно, при использовании для наружного освещения натриевых ламп расход электроэнергии снизится на 46 %.

6.9. Влияние напряжения сети на электропотребление

Активная и реактивная мощности, потребляемые электроприемниками, в любом режиме их работы зависят от величины подведенного напряжения. Зависимости потребляемых активной P и реактивной Q мощностей от напряжения называются статическими характеристиками нагрузок по напряжению.

Как правило, статические характеристики получают экспериментально. В каче-

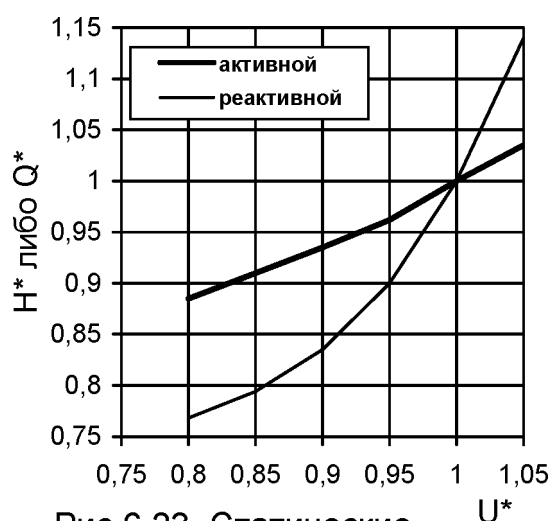


Рис.6.23. Статические характеристики нагрузки

стве иллюстрации на рис. 3.42 показаны статические характеристики для комбинированной нагрузки сети 10 кВ, создаваемой силовыми и осветительными электроприемниками.

При построении характеристик напряжение и мощности приняты в относительных единицах (U^* , P^* , Q^*). За единицу напряжения принято номинальное $U_{\text{ном}}$, а активной и реактивной мощностей – их зна-

чения $P_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$, потребляемые при номинальном напряжении. Как видно из рис. 3.42, в зависимости от величины фактического напряжения U активная мощность потребителя изменяется в меньшей степени, чем реактивная. Однако при исследовании электропотребления большой интерес представляет зависимость $P = f(U)$. Поэтому далее ограничимся рассмотрением только таких статических характеристик.

Для разных электроприемников и их групп статические характеристики имеют разный вид. Например, для ламп электрического освещения они могут быть представлены в виде следующих эмпирических выражений:

а) для ламп накаливания:

$$\frac{P}{P_{\text{ном}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{1,58}, \quad (6.54)$$

где P и $P_{\text{ном}}$ – активные мощности, потребляемые лампой при фактическом U и номинальном $U_{\text{ном}}$ напряжениях;

б) для люминесцентных ламп низкого давления (в комплекте с пускорегулирующими аппаратами):

$$\frac{P}{P_{\text{ном}}} = 1 + \frac{2 \cdot (U - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}}; \quad (6.55)$$

в) для ламп типа ДРЛ (в комплекте с пускорегулирующими аппаратами):

$$\frac{P}{P_{\text{ном}}} = \left[2,43 \cdot \frac{U}{U_{\text{ном}}} - 1,43 \right]. \quad (6.56)$$

В табл. 6.5 приведены результаты расчетов по выражениям (6.54)—(6.56), показывающие на сколько увеличивается потребление активной мощности осветительными приборами при повышении напряжения по отношению к $U_{\text{ном}}$ для различных источников света.

Таблица 6.5

Увеличение потребляемой мощности ламп освещения при повышении напряжения

Повышение напряжения, %	Повышение потребляемой мощности электроламп, %		
	накаливания	люминесцентные	типа ДРЛ
1	1,6	2,0	2,4
2	3,2	4,0	4,9
3	4,8	6,0	7,2
5	8,0	10,0	12,2
7	11,3	14,0	17,0

10	16,3	20,0	24,3
----	------	------	------

Из таблицы 6.5 следует, что для экономии электроэнергии необходимо по возможности понижать эксплуатационное напряжение, поддерживая его величину в допустимых пределах (не ниже $0,95 U_{ном}$). С этой целью в осветительных сетях применяются специальные тиристорные ограничители напряжения.

Величина подведенного напряжения оказывает влияние на основные характеристики электрических машин. В частности, вращающий момент синхронного двигателя прямо пропорционален напряжению, а асинхронного – квадрату напряжения.

Рассмотрим, как изменяется КПД и $\cos\varphi$ асинхронного двигателя с постоянным моментом нагрузки на валу при повышении и понижении напряжения. При повышении напряжения возрастает магнитный поток, что приводит к увеличению тока холостого хода и магнитных потерь мощности в стали. Следствием этого является снижение КПД и $\cos\varphi$ двигателя. Уменьшение подведенного напряжения при большом моменте нагрузки может привести к нарушению устойчивости работы двигателя, так как максимальный вращающий момент пропорционален квадрату напряжения. Поэтому отклонение напряжения на зажимах двигателя должно быть в допустимых пределах ($\pm 5\%$).

На рис. 6.24, 6.25 для двигателя мощностью 2,2 кВт при частоте вращения 1500 1/мин показаны соответственно зависимости КПД и $\cos\varphi$ от напряжения. Кривые 1 и 2 отражают зависимости при 60 и 100 % номинальной мощности нагрузки двигателя. Как видно из приведенных зависимостей, в энергетическом отношении наихуд-



Рис.6.24. Зависимость КПД от величины подведенного напряжения

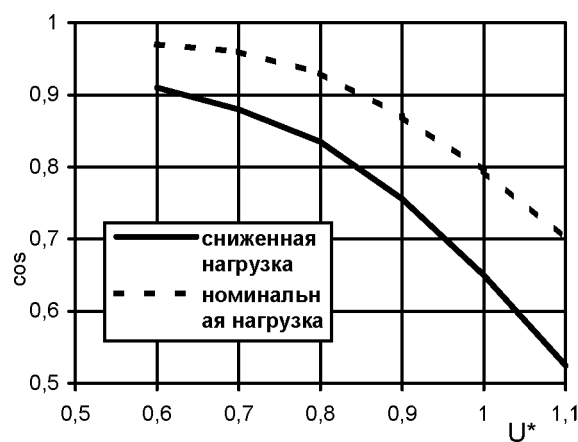


Рис.6.25. Зависимость $\cos\varphi$ от величины подведенного напряжения

шим вариантом является работа недогруженного двигателя при повышенном напряжении. В связи с этим при неполной систематической нагрузке, когда нет угрозы нарушения устойчивости работы двигателя, уменьшение напряжения дает возможность повысить КПД и $\cos \varphi$ электродвигателя, а следовательно, улучшить показатели электропотребления. Отметим, что отклонение напряжения от номинального в допустимых пределах в большей степени влияет на изменение $\cos \varphi$ и в меньшей – на КПД. Аналогичные зависимости характерны и для других асинхронных электродвигателей.

Активная мощность, потребляемая разнообразными технологическими электронагревательными устройствами пропорциональна квадрату подводимого напряжения

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (6.57)$$

где R – активное сопротивление нагревательного элемента.

Влияние уровней напряжения на электропотребление других характерных промышленных электроприемников строго не формализовано. В то же время изменение мощности, потребляемой комплексной нагрузкой (осветительная, силовая, выпрямительная, бытовая, потери в линиях и трансформаторах) в зависимости от изменения напряжения ΔU может быть представлено выражением:

$$\Delta P = a \Delta U, \quad (6.58)$$

где a – регулирующий эффект активной мощности по напряжению.

Для комплексной нагрузки $a = 0,3—0,75$. При этом, как правило, для отдельных составляющих нагрузки диапазон регулирующего эффекта шире, чем для комплексной нагрузки в целом.

На цеховых трансформаторных подстанциях можно регулировать напряжение на шинах до 1 кВ в пределах $\pm 5\%$ от $U_{\text{ном}}$ путем изменения коэффициента трансформации трансформаторов. Снижая напряжение на 5% можно уменьшить потребляемую активную мощность на величину:

$$\Delta P = (0,3 - 0,75) \cdot 5 = 1,5 - 3,75 \%. .$$

Таким образом, изменение напряжения в допустимых пределах ($\pm 5\%$ от $U_{\text{ном}}$) является одним из мероприятий по регулированию электропотребления в системах

электроснабжения. В [3] отмечается, что понижение уровней напряжения в цеховых сетях завода по производству минеральных удобрений привело к снижению удельных расходов в электроэнергии на 11,8—23,3 %.

Несимметричные режимы напряжения питающей сети обуславливаются несимметрией как источников, так и потребителей электроэнергии. Несимметрия напряжения оказывает неблагоприятное влияние на работу всех элементов системы электроснабжения и повышает потери мощности и энергии.

Несинусоидальность напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий возникает из-за наличия приемников электроэнергии с нелинейными вольтамперными характеристиками: преобразовательных установок, электросварочных аппаратов и машин, газоразрядных ламп и т. д.

Высшие гармоники в питающем напряжении вызывают дополнительные потери в электрических машинах, линиях электропередачи и трансформаторах, снижают пропускную способность элементов систем электроснабжения. При этом существенно сокращается срок службы изоляции электродвигателей, кабелей и конденсаторов. Поддержание показателей качества напряжения питающей сети в допустимых пределах способствует повышению эффективности энергоиспользования на промышленных предприятиях.

6.10. Снижение потерь мощности и электроэнергии в системах электроснабжения

В процессе передачи и распределения электроэнергии часть ее теряется (преобразуется в теплоту и рассеивается в окружающем пространстве) из-за протекания тока нагрузки через активные сопротивления элементов сети (линии электропередачи, трансформаторы, реакторы и т.п.), а также в магнитопроводах трансформаторов вне зависимости от наличия или отсутствия нагрузки.

Наряду с термином "потери" в электроэнергетике в последнее время применяется понятие "технологический расход электроэнергии в электрических сетях". Если под потерями понимать не только непроизводительный расход электроэнергии из-за неоптимального ведения режима или нерациональной структуры системы электроснабжения, но и объективно необходимые затраты энергии на ее транспорт, то оба

понятия являются практически адекватными. Поэтому в дальнейшем будем применять более распространенный, устоявшийся термин – потери.

Потери электроэнергии имеют место во многих элементах систем электроснабжения. Однако львиная доля их падает на линии электропередачи и силовые трансформаторы.

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения и электрооборудования следует принимать решения, направленные на оптимальное снижение потерь энергоресурсов. Потери активной электроэнергии на нагревание в линиях электропередачи, токопроводах и других элементах, обладающих активным сопротивлением R , за расчетный период T_p могут быть найдены по выражению

$$\Delta W = \frac{K_{фа}^2 \cdot P_c^2 + K_{фр}^2 \cdot Q_c^2}{U_{НОМ}^2} \cdot R \cdot T_p, \quad (6.59)$$

где $K_{фа}$ и $K_{фр}$ - коэффициенты формы графиков нагрузки по активной и реактивной мощности; P_c и Q_c - средние величины активной и реактивной нагрузок за время T_p ; R - активное сопротивление проводника.

Анализ формулы (6.59) показывает, что уменьшение потерь электроэнергии может быть достигнуто повышением $U_{НОМ}$ и снижением величин остальных ее составляющих.

Средняя активная нагрузка зависит от производительности оборудования и установленных режимов работы электроприемников. Следовательно, величина P_c может быть уменьшена совершенствованием технологического процесса, применением энергоэффективных электроприемников, рациональным расходом электроэнергии на освещение, вентиляцию, выработку сжатого воздуха и т.п.

Снижение величины Q_c осуществляется путем компенсации реактивной мощности. Уменьшение потерь активной мощности при этом определяется по выражению:

$$\delta P = (2 \cdot Q \cdot Q_k - Q_k^2) \cdot \frac{R}{U_{НОМ}^2}, \quad (6.60)$$

где Q - реактивная мощность, протекающая через элемент СЭС до компенсации; Q_k - суммарная мощность компенсирующих устройств, установленных у потребителей, питающихся через данный элемент; R - активное сопротивление элемента; $U_{ном}$ - номинальное напряжение.

Снижение величин $K_{фа}$ и $K_{фр}$ достигается выравниванием графиков электрических нагрузок. При определении потерь электроэнергии, как правило, принимают значения $K_{фа}$ и $K_{фр}$ одинаковыми, равными коэффициенту формы графика нагрузки по току $K_{ф}$. В этом случае коэффициент формы графика нагрузки

$$K_{ф} = \frac{I_{ск}}{I_c}, \quad (6.61)$$

где $I_{ск}$ и I_c - соответственно значения среднеквадратического и среднего тока за рассматриваемый период.

Средний и среднеквадратический токи при наличии графика нагрузки определяются по следующим выражениям

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^m I_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}; \quad (6.62)$$

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}}, \quad (6.63)$$

где I_i - среднее значение тока для i -ой ступени графика; Δt_i - продолжительность i -го интервала осреднения нагрузки; m - количество ступеней графика.

При расчете потерь электроэнергии по току нагрузки используется выражение

$$\Delta W = 3 \cdot K_{ф}^2 \cdot I_c^2 \cdot R \cdot T_p, \quad (6.64)$$

Если при одной и той же средней нагрузке коэффициент формы графика $K_{ф1}$ снижается до значения $K_{ф2}$, то потери активной электроэнергии уменьшаются на величину

$$\delta W = 3 \cdot I_c^2 \cdot R \cdot T_p \cdot (K_{ф1}^2 - K_{ф2}^2). \quad (6.65)$$

Как известно, при равномерном графике нагрузки $K_{\phi}=1$. При достижении такой конфигурации графика снижение потерь активной электроэнергии определяется выражением:

$$\delta W = 3 \cdot I_c^2 \cdot R \cdot T_p \cdot (K_{\phi 1}^2 - 1). \quad (6.66)$$

Выравнивание суточного графика нагрузки потребителя электроэнергии позволяет также снизить плату за заявленную мощность, что уменьшает себестоимость продукции.

Для регулирования графика нагрузки на промышленном предприятии выявляются потребители-регуляторы, т.е. такое электротехническое оборудование, которое может работать в режиме регулирования мощности в соответствии с потребностями энергосистемы. К ним могут быть отнесены нагревательные печи, компрессорные и насосные станции, вспомогательные цехи и т.п.

К основным мероприятиям по регулированию графиков электрических нагрузок относятся:

- 1) широкое применение заделов производства, запасов материалов и промежуточных продуктов;
- 2) отключение вспомогательного оборудования и проведение профилактического обслуживания в часы максимума энергосистемы;
- 3) применение различных аккумулирующих устройств, используемых в качестве потребителей-регуляторов;
- 4) поочередная загрузка, пуск и остановка однотипных агрегатов в часы максимума нагрузки;
- 5) изменение режима работы энергоемких агрегатов в течение суток;
- 6) смещение времени начала и перерывов в работе отдельных структурных подразделений;
- 7) временное ограничение производительности производственного оборудования.

При проектировании и эксплуатации СЭС могут предусматриваться мероприятия по снижению сопротивления линий электропередачи путем применения жил кабелей или проводов с большими сечениями, использования проводникового материала с меньшим удельным сопротивлением, уменьшения длины линии. Получае-

мое при этом снижение потерь активной электроэнергии определяется по выражению

$$\delta W = 3 \cdot I_c^2 \cdot K_{\phi}^2 \cdot T_p \cdot (r_{01} \cdot l_{01} - r_{02} \cdot l_{02}), \quad (6.67)$$

где r_{01} и l_{01} - удельное активное сопротивление и длины линии в исходном режиме; r_{02} и l_{02} - тоже, но после внедрения мероприятий по снижению активного сопротивления линии.

Применение более высокого напряжения без изменения сечения проводников при одной и той же мощности нагрузки снижает ток линии, что уменьшает потери активной электроэнергии на величину:

$$\delta W = 3 \cdot R \cdot K_{\phi}^2 \cdot T_p \cdot (I_{c1}^2 - I_{c2}^2), \quad (6.68)$$

где I_{c1} и I_{c2} - средний за время T_p ток нагрузки линии при низшем и высшем напряжениях соответственно.

При более высоком напряжении могут быть применены проводники с меньшим сечением, что снижает расход цветного металла, но увеличивает удельное активное сопротивление линии. В данном случае выражение (6.68) приобретает следующий вид:

$$\delta W = 3 \cdot l \cdot K_{\phi}^2 \cdot T_p \cdot (r_{01} \cdot I_{c1}^2 - r_{02} \cdot I_{c2}^2), \quad (6.69)$$

где l - длина линии; r_{01} и r_{02} - удельное активное сопротивление линии при низшем и высшем напряжениях соответственно.

Потери электроэнергии в силовых двухобмоточных трансформаторах могут быть вычислены по формуле

$$\Delta W = \Delta P_x \cdot T_v + \Delta P_k \cdot K_{\phi}^2 \cdot \left(\frac{S_c}{S_{ном}} \right)^2 \cdot T_p, \quad (6.70)$$

где ΔP_x и ΔP_k - потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора;

T_v и T_p - число часов включения и работы трансформатора с нагрузкой соответственно; S_c - среднее значение полной мощности нагрузки трансформатора за время работы; $S_{ном}$ - номинальная мощность трансформатора.

Снижение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах достигается правильным выбором их номинальных мощностей и поддержанием рационального режима работы.

Коэффициент загрузки трансформатора, соответствующий минимальным потерям мощности, определяется из выражения

$$\beta_T = \sqrt{\frac{\Delta P'_x}{\Delta P'_k}}, \quad (6.71)$$

где $\Delta P'_x$ и $\Delta P'_k$ - приведенные потери холостого хода и КЗ трансформатора.

Приведенные потери холостого хода

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + \kappa_{ин} \cdot \Delta Q_x, \quad (6.72)$$

где ΔP_x и ΔQ_x - потери активной и реактивной мощности холостого хода трансформатора; $\kappa_{ин}$ - коэффициент изменения потерь, ориентировочно принимаемый для промышленных предприятий 0,07 кВт/квар

Приведенные потери короткого замыкания

$$\Delta P'_k = \Delta P_k + \kappa_{ин} \cdot \Delta Q_k, \quad (6.73)$$

где ΔP_k и ΔQ_k - потери активной и реактивной мощности КЗ трансформатора.

Величины ΔQ_x и ΔQ_k вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \Delta Q_x &= \frac{I_x \cdot S_{ном}}{100}; \\ \Delta Q_k &= \frac{U_k \cdot S_{ном}}{100}, \end{aligned} \quad (6.74)$$

где I_x - ток холостого хода трансформатора; U_k - напряжение короткого замыкания.

При работе n однотипных трансформаторов одинаковой единичной мощности $S_{ном}$ на общую нагрузку целесообразно отключить один трансформатор для снижения суммарных потерь мощности, если общая нагрузка окажется меньше величины

$$S_A = S_{ном} \cdot \sqrt{n \cdot (n - 1) \cdot \frac{\Delta P'_x}{\Delta P'_k}}. \quad (6.75)$$

Если общая нагрузка превышает S_A , то экономически выгодно подключить к работающим трансформаторам еще один трансформатор.

Пример 6.10. Определить, насколько снизятся потери активной мощности в линии электропередачи 10 кВ длиной 1,5 км, выполненной кабелем ААБ-10(3х70), при установке у потребителей компенсирующих устройств общей мощностью $Q_k = 600$ квар. Реактивная нагрузка линии до компенсации $Q = 1200$ квар.

Решение. Для кабеля ААБ-10(3х70) удельное активное сопротивление

$r_0 = 0,447$ Ом/км. Тогда активное сопротивление кабельной линии

$$R = r_0 \cdot l; R = 0,447 \cdot 1,5 = 0,67 \text{ Ом.}$$

По формуле (6.60) находим величину снижения потерь активной мощности:

$$\delta P = (2 \cdot 1200 \cdot 600 - 600^2) \cdot (0,67 / 10^2) \cdot 10^{-3} = 7,2 \text{ кВт.}$$

Пример 6.11. Потребитель питается по линии 10 кВ длиной 2,6 км, выполненной кабелем ААБ-10(3х95). В течение суток ток нагрузки линии имеет следующие значения и соответствующие им длительности: 120 А - 5 ч, 80 А - 5 ч, 60 А - 6 ч, 30 А - 8 ч. Определить, на сколько уменьшатся потери активной электроэнергии в линии за сутки при полном выравнивании графика, при котором сохраняется то же электропотребление, а коэффициент формы графика снижается до 1.

Решение. Удельное активное сопротивление кабеля ААБ-10(3х95) $r_0 = 0,329$ Ом/км. В этом случае для линии длиной 2,6 км активное сопротивление:

$$R = 0,329 \cdot 2,6 = 0,848 \text{ Ом.}$$

По выражению (6.62) находим среднее значение тока линии за сутки

$$I_c = \frac{120 \cdot 5 + 80 \cdot 5 + 60 \cdot 6 + 30 \cdot 8}{24} = 66,7 \text{ А.}$$

Среднеквадратический ток линии вычисляется по формуле (6.63)

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 5 + 80^2 \cdot 5 + 60^2 \cdot 6 + 30^2 \cdot 8}{24}} = 74,4 \text{ А.}$$

Коэффициент формы исходного графика нагрузки определяется из выражения (6.61)

$$K_\phi = \frac{74,4}{66,7} = 1,12.$$

По формуле (6.66) находим, на сколько снизятся потери электроэнергии в линии электропередачи за сутки при выравнивании ее графика

$$\delta W = 3 \cdot 66,7^2 \cdot 0,848 \cdot 24 \cdot (1,12^2 - 1) \cdot 10^{-3} = 69,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Пример 6.12. Электроснабжение потребителя, имеющего среднегодовую полную мощность нагрузки $S_c = 1200 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, может производиться на напряжении 6 или 10 кВ по линии с активным сопротивлением $R = 1,2 \text{ Ом}$. Коэффициент формы графика нагрузки линии $K_\phi = 1,05$. Определить величину экономии годовых потерь активной электроэнергии в линии при применении напряжения 10 кВ.

Решение. Вычислим среднегодовые значения тока линии при напряжениях 6 и 10 кВ:

$$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}; \quad I_{c1} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 6} = 115,6 \text{ А}; \quad I_{c2} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 10} = 69,4 \text{ А.}$$

Экономия годовых потерь активной электроэнергии в линии при использовании более высокого напряжения подсчитаем по формуле (6.68):

$$\delta W = 3 \cdot 1,2 \cdot 1,05^2 \cdot 8760 \cdot (115,6^2 - 69,4^2) \cdot 10^{-3} = 297165,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Пример 6.13. На цеховой подстанции 10/0,4 кВ установлены два трансформатора типа ТМЗ-1000/10, работающие на общую нагрузку. Каждый трансформатор имеет следующие параметры:

$S_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $\Delta P_x = 1,8 \text{ кВт}$; $\Delta P_k = 10,8 \text{ кВт}$; $I_x = 1,2 \%$; $U_k = 5,5\%$. Коэффициент изменения потерь $K_{\text{ин}} = 0,07 \text{ кВт/квар}$. Определить длительную нагрузку трансформаторной подстанции, при которой целесообразно отключить один из трансформаторов с целью снижения суммарных потерь мощности.

Решение. Произведем расчет потерь реактивной мощности холостого хода и КЗ трансформатора по формулам (6.74):

$$\Delta Q_x = \frac{1,2 \cdot 1000}{100} = 12 \text{ квар}; \quad \Delta Q_k = \frac{10,5 \cdot 1000}{100} = 105 \text{ квар.}$$

Приведенные потери холостого хода и короткого замыкания для трансформатора подсчитываются по выражениям (6.72) и (6.73)

$$\Delta P'_x = 1,9 + 0,07 \cdot 12 = 2,74 \text{ кВт}; \quad \Delta P'_k = 10,8 + 0,07 \cdot 105 = 18,15 \text{ кВт.}$$

По формуле (6.75) вычислим:

$$S_A = 1000 \cdot \sqrt{2 \cdot (2 - 1) \frac{2,74}{18,15}} = 549,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Отключение одного трансформатора целесообразно в тех случаях, когда длительная нагрузка трансформаторной подстанции меньше величины 549,5 кВ·А.

7. Энергоэффективное обеспечение теплотехнологических процессов предприятий дорожной отрасли

7.1. Производство асфальтобетонных смесей

Сравнительная энергетическая характеристика производства АБС среди других процессов и материалов приведена на рис. В.4, а подобная эксергетическая характеристика - на рис. 7.1. Производство АБС занимает скромное место в ряду удельной энергоемкости материалов, но в суммарном энергопотреблении РБ, благодаря крупнотоннажности, оно играет более заметную роль. Годовая потребность оценивается в $1 \cdot 10^1$ млн. тонн, в действительности за 2000 год было произведено и вложено в одежду автомобильных дорог 1,573 млн. тонн, на что израсходовано 29554 тонн условного топлива энергоресурсов. В 1990 году вместе с облдорстройями было произведено асфальтобетонной смеси 9,5 миллионов тонн. Нетрудно оценить годовой расход энергоресурсов в РБ на выпуск АБС при величине удельных энергозатрат $5 \cdot 10^2$ МДж/т. Очевидна необходимость уменьшения энергопресса дорожной отрасли на экономику РБ, что возможно лишь при снижении удельного энергопотребления. Здесь уместно отметить, что в технически передовых странах последнее составляет величину $2,7 \cdot 10^2 - 3,3 \cdot 10^2$ МДж/т, т.е. в два раза ниже. Правда и в этом случае, объективная термодинамическая оценка производства по эксергетическому КПД_э невысока (рис. 7.1), что указывает на имеющиеся существенные (на порядок уменьшаются удельные энергозатраты) резервы рационального энергообеспечения данной теплотехнологии.

Существуют альтернативные технологии устройства твердого дорожного покрытия, например, технология использования холодной АБС с применением водобитумной эмульсии. Однако, в таком специфическом и важном производстве пе-

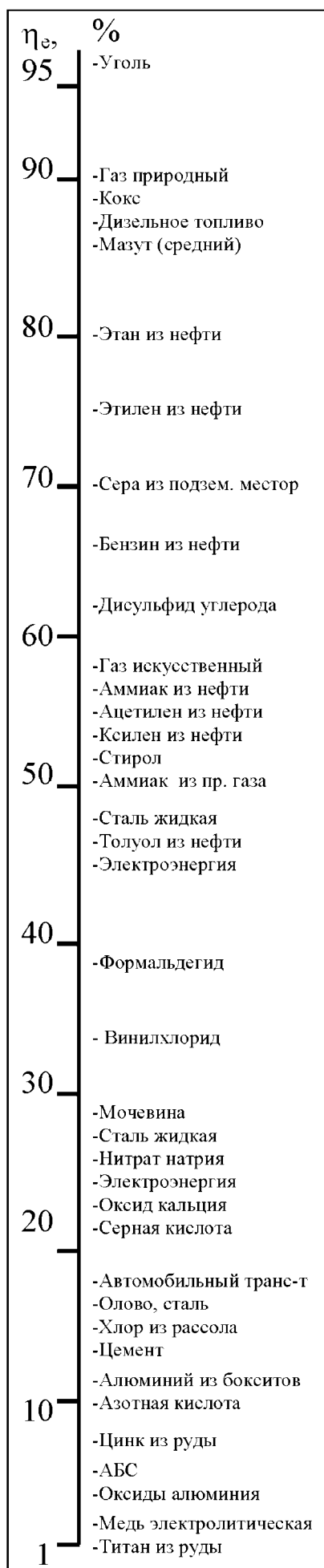


Рис.5.1. Эксергетическая эффективность процессов получения различных материалов

реход на монотехнологию чрезвычайно рискован в перспективе, поскольку связан с большой неопределенностью. Даже страны, явившиеся пионерами создания технологии холодного асфальтобетона (например, Франция) не увеличивает его долю в общем производстве АБС, оцениваемую 40 %. Таким образом, технология горячей АБС в обозримом будущем не потеряет своей актуальности, что обосновывает необходимость ее энергетической реабилитации.

Рассмотрим структуру энергопотребления производства асфальтобетона. Удельные энергозатраты на выпуск АБС определяют 50% расхода энергии на создание асфальтобетонного покрытия. Еще 2 % энергии требуется на уплотнение слоя покрытия с помощью катков и оставшаяся часть, фактически половина энергозатрат, расходуется на доставку АБС от завода до места укладки (если при этом плечо автоперевозок не превышает 20 км). Последнее обстоятельство указывает на невозможность создания крупного предприятия по выпуску АБС. Необходима сеть асфальтобетонных заводов(АБЗ), расположенная некоторым образом по территории РБ. Возникает задача оптимизации густоты сетки расположения асфальтобетонных заводов в сложившейся урбанизационной инфраструктуре, при которой будут минимальными затраты на производство и доставку АБС. Численность АБЗ на территории РБ превышает $2 \cdot 10^2$. Сложность задачи очевидна, поскольку затрагивает и требуемый парк автосамосвалов, как количественный, так и качественный, и пр., что иллюстрирует необходимость системного подхода к любой достаточно важной проблеме. Напомним, основопола-

гающие решения закладываются на начальных стадиях жизни технической системы (рис.3.1).

С течением времени, объем средств, вложенных в объект, непрерывно растет, а возможность влияния на его характеристики падает. Сопоставляя вышеприведенные цифры о влиянии фаз существования объекта с цифрами перерасхода энергии при выпуске АБС, становится очевидным неизбежность изменения структуры системы энергообеспечения теплотехнологического процесса, т.е. глубоких изменений. Здесь следует остановиться на тех трудностях, которые не позволяют сегодня добиться кардинального улучшения ситуации с энергопотреблением в промышленности: необходимые структурные изменения не позволяет провести существующая компоновка оборудования в объеме цеха. Как правило, требуется демонтаж, что означает создание производства заново. К счастью, специфика компоновки АБЗ чаще всего не требует крупных работ по демонтажу оборудования, что объясняется отсутствием крытых цехов, открытой компоновкой оборудования, расположением АБЗ вне стесненных промышленных зон.

Неизбежные трудности столь глубоких перемен, связанных с реструктуризацией всей системы, окупаются весьма эффективно. При существующей норме прибыли и энергетической составляющей себестоимости 20 – 30 %, характерной для многих видов продукции, в том числе и для АБС, снижение энергопотребления на 10 – 20 % дает результат, сопоставимый с тем, который отмечается при увеличении объема производства на 50%. Но в последнем случае необходимо наличие новых рынков сбыта, что не всегда выполняется.

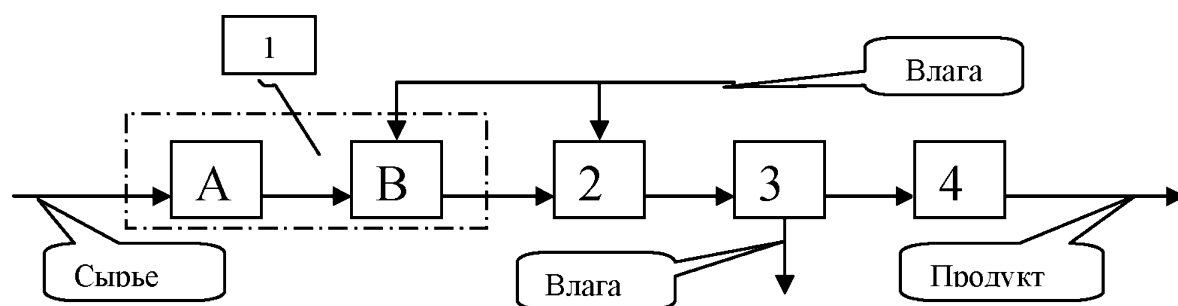


Рис. 7.2. Схема подготовительных звеньев производства АБС:

- 1 – доставка сырья на АБЗ, А – транспорт сырья, В – складирование сырья;
- 2 – предварительная подготовка и транспорт полуфабриката;
- 3 – обезвоживание и нагрев полуфабриката до температуры операции; 4 – транспорт продукта до смесителя.

Принципиальная технологическая схема производства АБС приведена ранее (рис. 3.7). Для облегчения анализа она может быть представлена укрупненной структурной схемой (рис.3,8), а каждое подготовительное звено последней, в свою очередь, схематично изображено на рис. 7.2. Подобный разбор любого технологического процесса совершенно необходим для повышения эффективности его энергообеспечения – это безусловное требование. Он еще иллюстрирует тот факт, что специалист в вопросах энергосбережения должен владеть достаточно глубоко технологией того или иного производства. В этой связи, здесь необходимо более подробно рассмотреть с энергетической точки зрения и продукцию завода - АБС.

Состав АБС изменяется в зависимости от назначения создаваемого с ее помощью слоя дорожной одежды. В то же время, для решения подобных задач может быть принят осредненный состав, представленный на рис. 7.3. Такая виртуальная

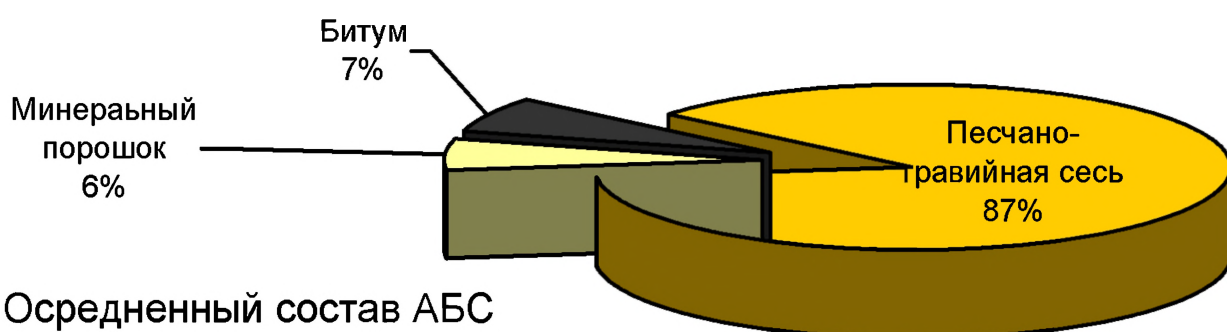


Рис.7.3. Осредненный состав АБС

АБС состоит на 87% из минерального заполнителя (МЗ) или, что тоже самое, песчано-гравийной смеси (ПГС), в химический состав которого входит, прежде всего, диоксид кремния – SiO_2 . ПГС - дисперсный материал, чрезвычайно широкого фракционного состава: от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до $20 \cdot 10^{-3}$ м. Для тепловой обработки такого материала наиболее подходит вращающийся барабан, имеющий небольшой уклон, что обеспечивает, при пересыпании за счет вращения, движение твердого, дисперсного материала от одного торца к другому. Кроме обрабатываемого материала, в барабан подаются дымовые газы, являющиеся сушильным агентом в процессе сушки и затем, в процессе нагрева до технологической температуры, греющей средой.

Другим компонентом, используемым в АБС, является минеральный наполнитель или минеральный порошок (МП), чаще всего доломитовый, имеющий химическую формулу – CaCO_3 . Это мелкодисперсный материал, диаметр частиц которого не превышает $0,05 \cdot 10^{-3}$ м. Такой мелкодисперсный порошок чрезвычайно сложно под-

вергать тепловой обработке, поэтому при производстве АБС минеральный наполнитель перед смешением не нагревается и подается в смеситель холодным. Небольшое количество МП ($\approx 6\%$) позволяет нагревать его до требуемой температуры непосредственно в процессе смешения за счет энергии ПГС. (Отметим это обстоятельство, которое нам понадобится в дальнейшем).

Третьим обязательным компонентом АБС является вяжущий материал – битум, содержание которого в АБС также невелико ($\approx 7\%$). Это продукт перегонки нефти, но точная молекулярная структура битума неизвестна. Битум подвергается несложной, но, благодаря ряду причин объективного и субъективного характера, громоздкой и крайне несовершенной теплотехнологической обработке: паровому разогреву при сливе из железнодорожных цистерн, разогреву и поддержанию температуры, допускающей перекачку битума по обогреваемому трубопроводу, обезвоживание и нагрев до температуры операции перед смешением. Последнее происходит за счет газового отопления в специальных жаровых котлах, или за счет электрического обогрева. И то, и другое, надо отметить, используется параллельно с использованием пара, вырабатываемого котельной, специально включаемой в структуру завода.

В момент укладки АБС должна иметь температуру $\approx 1,0 \cdot 10^2$ °С, что с учетом температуры наружного воздуха и дальности перевозки, определяющих охлаждение смеси, определяет температуру готового продукта АБЗ $\approx 1,6 \cdot 10^2$ °С. Этим устанавливается температура нагрева компонентов АБС в процессе теплотехнологической обработки перед смешением и, безусловно, энтальпия АБС. Для указанных выше состава и температуры АБС энтальпия ее имеет структуру (рис. 7.4) и значение рав-

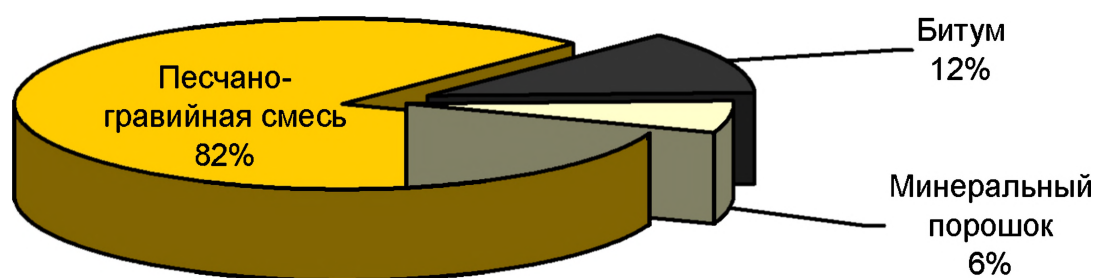


Рис.7.4. Структура энтальпии АБС осредненного состава при $t = 160$ °С.

ное $1,4 \cdot 10^2$ кДж/кг. При $t = 200$ °С величина энтальпии, определяемая в данном случае энергию АБС, оценивается $1,8 \cdot 10^2$ кДж/кг.

Полезный эффект тепловой обработки складывается из увеличения энтальпии компонентов и расхода энергии на получение обезвоженного состава. При начальной влажности ПГС $\approx 4\%$ и температуре 20°C полезный эффект теплотехнологической обработки оценивается $\approx 2,6 \cdot 10^2 \text{ кДж/кг}$. Показательно, что энергия, затрачиваемая на испарение воды из обводненного битума, не может быть отнесена к полезному эффекту, поскольку вода в битум попадает вследствие несовершенства организации процесса доставки его на АБЗ и производства внутри АБЗ. Соответствующие затраты энергии и эксергии, связанные с превышением влажности МЗ над средними значениями и с какой бы то ни было обводненностью битума, следует относить к перерасходу энергии и потерям эксергии и, ни в коем разе, к полезному эффекту. В противном случае имеет место парадоксальная ситуация: рост энергетического КПД при безответственной организации технологического процесса в целом.

В любом случае, объективно наиболее энергоемким процессом является теплотехнологическая обработка минеральных заполнителей, которыми являются песок, гравий, щебень.

В схеме производства АБС принципиально все технологические подготовительные процессы можно разбить на четырех стадии: транспорт сырья и его складирование, предварительная подготовка и транспорт полуфабриката, тепловая обработка полуфабриката, транспорт полуфабриката до смесителя, рис. 7.2. На первых двух стадиях, прямо не связанных с тепловой обработкой и затратами энергоресурсов, тем не менее, оказывается существенное влияние на величину энергозатрат и на это, при системном подходе, следует обратить внимание в части блокирования путей увлажнения минеральных и обводнения битума.

Увеличение влажности только минеральных материалов в сравнении с их равновесной влажностью приводит к росту энергозатрат при тепловой обработке на $1 \cdot 10^1 \%$ на каждый 1% дополнительной влажности. Для уменьшения этого негативного момента определяющим оказывается блокирование путей увлажнения сырья и полуфабрикатов перед тепловой обработкой. Необходима разработка комплекса мероприятий по защите от грунтовых вод, атмосферных осадков и пр.: планировка площадок для отвода ливневых и талых вод, навесы над конвейерами и крытые склады для исходного сырья.

Традиционно источниками энергии АБЗ являются газообразное или жидкое топливо, котельная и электрические сети энергосистемы. Осредненная структура приходной части энергобаланса производства представлена на рис. 7.5.

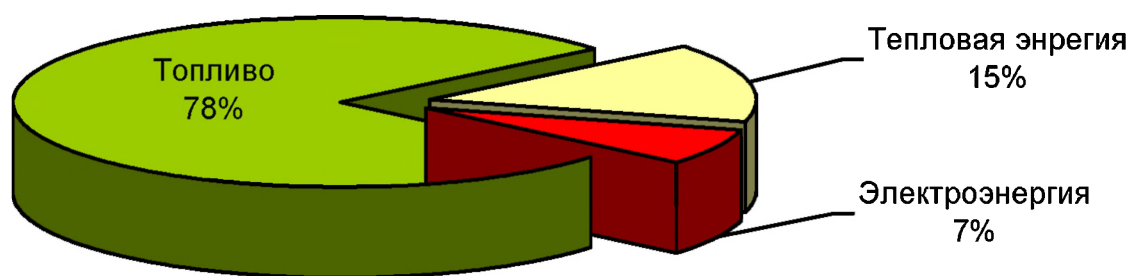


Рис. 7.5. Структура приходной части энергобаланса АБЗ.

Из рис. 7.5 следует, что производство АБС является, прежде всего, теплопотребляющим. Вместе с тем, благодаря тому, что по технологическому процессу температура тепловой обработки на всех его этапах не превышает $2 \cdot 10^2$ °С, структура приходной части конкретного производства может быть практически любой, поскольку такой уровень температуры обеспечивается любым перечисленным источником энергии. Таким образом, источники энергии должны определяться из соображений энергетической целесообразности с учетом ограничений, накладываемых на систему, со стороны иерархически выше стоящих систем связанных с энергообеспечением. Для решения поставленной задачи необходим более глубокий анализ процессов протекающих в ходе тепловой обработки составляющих АБС.

Прежде всего надо отметить, что битум выпускается нефтеперегонным заводом нагретым примерно до $2 \cdot 10^2$ °С и, естественно, обезвоженным. Следовательно, "все-го-навсего", требуется доставить его неохлажденным и использовать, в этом случае, без дополнительного нагрева, подавая прямо на смешение.

Один из вариантов решения – использование автомобильных полуприцепов-битумовозов. В этом случае тягач оставляет доставленный полуприцеп непосредственно у смесителя, забирая опорожненный. Битум поступает на смешение непосредственно из полуприцепа за счет избыточного давления, создаваемого в последнем. При доставке битума на расстояние более 100 километров транспортные затраты данной технологии превышают затраты на разогрев битума в условиях АБЗ.

В этой связи, весьма перспективным является доставка битума железнодорожным транспортом в теплоизолированных цистернах. При должной изоляции темп охлаждения битума в цистернах невелик и остывание на $\approx 1 \cdot 10^2$ °С происходит в течение 3-х недель. Для устранения окисления битума в ходе такой доставки несложно создать в цистерне защитную атмосферу из диоксида углерода, азота и т.п. Слив битума, в этом случае, происходит за счет избыточного давления создаваемого сжатым воздухом, через специальное соединение цистерны с битумопроводом подающим его в расходную емкость у смесителя.

В случае необходимости использования битума из резервных хранилищ, они должны быть наземными, исключая обводнение (подобно мазутохранилищам). Нагрев битума в этих хранилищах следует осуществлять до минимальной температуры, позволяющей его перекачку.

Дальнейший нагрев битума следует осуществлять непосредственно в смесителе (подобно нагреву минерального порошка, о чем ранее говорилось) за счет энергии ПГС, которую для этого требуется перегреть всего на 5 – 10 °С, что никак не скажется на работе сушильно-нагревательного барабана.

Таким образом, из структуры завода *исключается котельная и все паровое хозяйство*. Кроме энергетических преимуществ достигаются технологические улучшения, влияющие на качество АБС: битум не контактирует с перегретой поверхностью. В процессе такого контакта он ухудшает свои свойства и пр.

В результате, в структуре производства остается лишь один теплотехнологический агрегат – сушильно-нагревательный барабан (СБ) для тепловой подготовки минеральных наполнителей. Данный пример теплотехнологической перестройки производства весьма показателен. Но на этом он не заканчивается.

Узким местом производства АБС является крайне неравномерный график, связанный с сезоном года, со световым временем суток, с погодными условиями, с подачей автосамосвалов за готовой продукцией. В итоге основное оборудование используется относительно непродолжительное время, что, кроме всего прочего, для огнетехнических агрегатов сопровождается ускоренным износом, непродуктивными затратами энергии. Для смягчения столь жесткого режима на заводах устанавливаются изотермические емкости для накопления и хранения готовой АБС. Подобные

изотермические емкости можно применить для накопления в ночное время горячей песчано-гравийной смеси, которая в светлое время суток используется для производства АБС. В этом случае возможно несколько вариантов работы завода:

- 1) СБ работают круглосуточно в режиме, обеспечивающем наибольшую экономичность;
- 2) при неизменной мощности СБ увеличивается в два – три раза производительность завода.

В обоих случаях достигаемый экономический эффект превышает затраты в связи с перерасходом энергии, обусловленным увеличением рассеяния ее в окружающую среду конструкцией изотермических емкостей-накопителей.

Теперь обратимся к анализу работы непосредственно СБ. Расходная часть его энергобаланса представлена на рис.7.6.

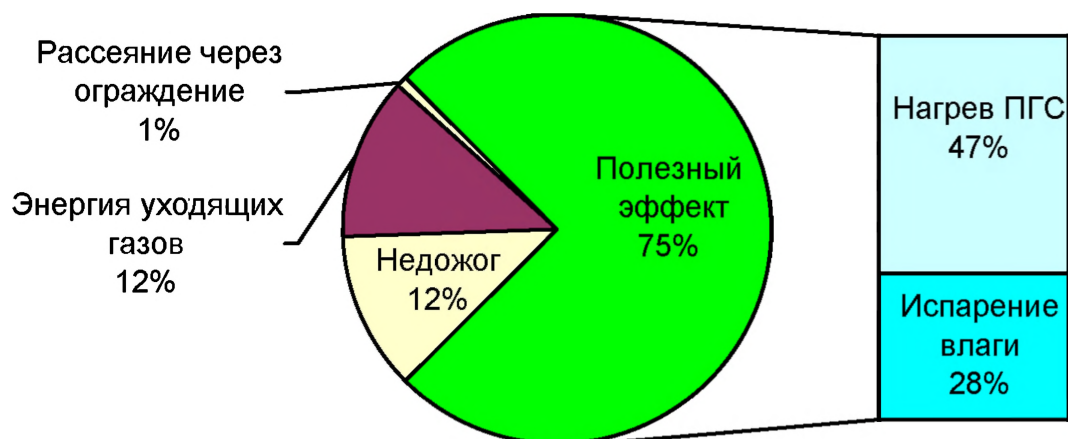


Рис.7.6. Структура расходной части энергобаланса сушильно-нагревательного агрегата традиционной схемы

Обращает, прежде всего, на себя внимание наличие недожога при использовании газообразного и жидкого топлива. Этот нонсенс объясняется просыпанием через факел горения топлива, находящийся внутри барабана, минеральных материалов, невысокая температура которых ($2 \cdot 10^2$ °C) приводит к конденсации на поверхности ПГС углерода в виде сажи, поскольку для горения природного газа требуется температура не ниже 550°С. Помещение факела внутри СБ вызвано рядом причин, актуальных ранее: интенсификация на 10% теплообмена и, в итоге, всего процесса, более простой конструкцией и ее обслуживанием. Однако, в настоящее время цена такого решения недопустимо высока. Недожог топлива должен отсутствовать безус-

ловно, для чего, с помощью того или иного технического решения, следует исключить просыпание материала через зону горения.

В структуре расходной части энергобаланса СБ неоправданно большую часть занимает энергия уходящих газов, что связано с применением атмосферного воздуха для приготовления сушильного агента. Температура сушильного агента, исходя из конструкции СБ и требований нагрева ПГС, не должна превышать 900°C . Обычно она еще ниже и достигается это за счет подачи воздуха в 3 – 4 раза больше, чем требуется для горения топлива, используемого при работе СБ. В конечном итоге, этот избыточный воздух нагревается от температуры окружающей среды ($2 \cdot 10^1$ $^{\circ}\text{C}$) до температуры отработанного сушильного агента ($\approx 1,5 \cdot 10^2$ $^{\circ}\text{C}$) и выбрасывается в атмосферу. На каждый кубический метр газа это $\approx 4 \cdot 10^1$ кубических метров воздуха. Для изменения положения необходимо применить иной способ приготовления сушильного агента. Требуемое понижение температуры дымовых газов можно добиться за счет рециркуляции отработанного сушильного агента, что несколько усложняет конструкцию и эксплуатацию, но дает снижение энергии уходящих газов и рас-

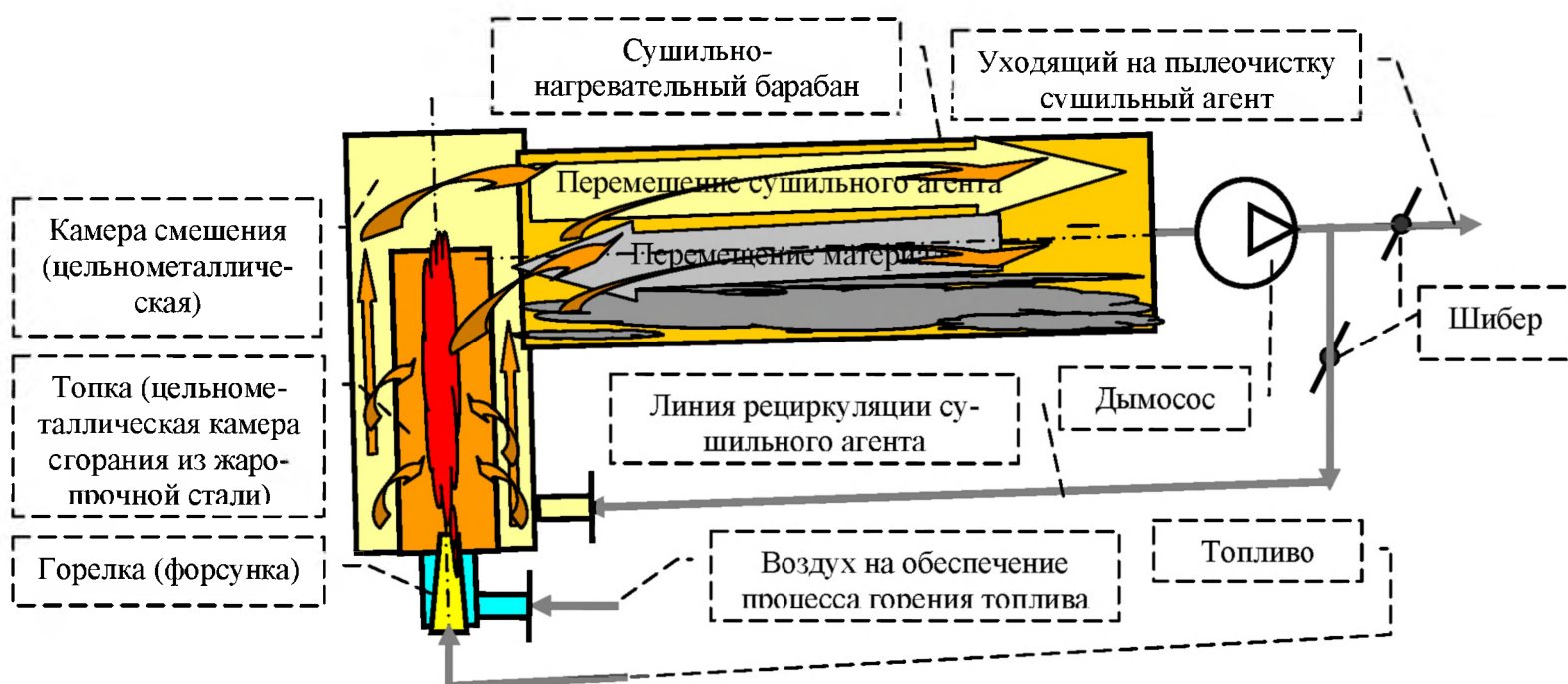


Рис.7.7. Схема сушильно-нагревательного устройства, обеспечивающая отсутствие механического недожога топлива и увеличение энергии уходящего отработанного сушильного агента за счет избыточного воздуха в составе последнего хода топлива на 7%. Расход сушильного агента (СА) внутри барабана практически не изменяется, что не изменяет уноса мелких частиц. Соответственно уменьшается и тепловая нагрузка на окружающую среду. На рис.7.7 приведена соответствующая

вышеизложенному схема СБ. Очевидна простота и малозатратность изменений конструкции устройства традиционного исполнения.

В итоге устранения недожога и избыточного воздуха структура расходной части

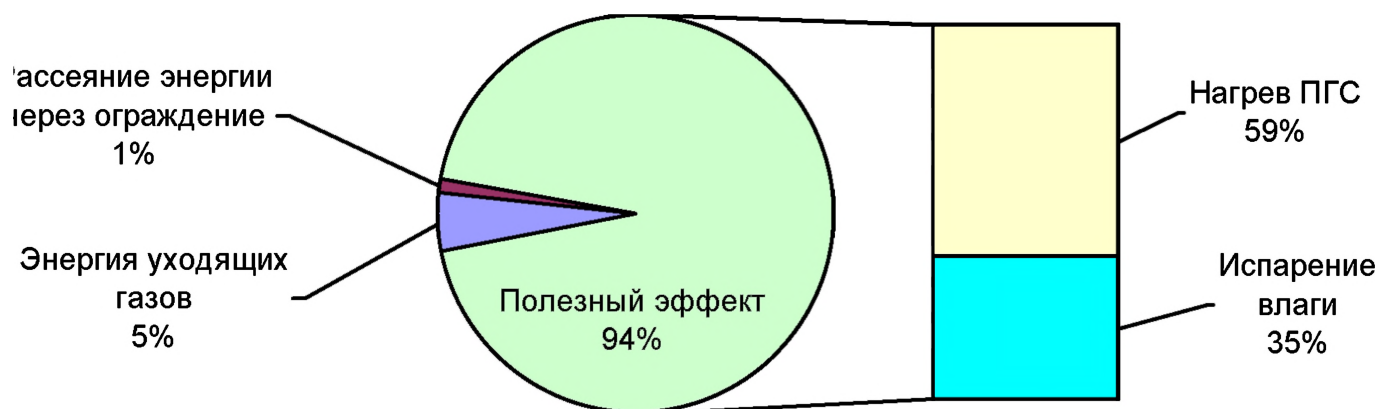


Рис.7.8. Структура расходной части энергобаланса модернизированного СБ

баланса энергии СБ имеет вид, рис.7.8.

Сопоставление энергобалансов СБ (рис.7.6, 7.8) позволяет убедиться в возможностях теплотехнологической перестройки производства, обеспечивающей существенное улучшение показателей энергопотребления. Дальнейшее снижение расхода первичного топлива возможно за счет повышения качества использования энергоресурсов.

Объективным показателем качества использования первичной энергии в той или иной технологии, степени ее термодинамического совершенства является, как уже отмечалось, эксергетический КПД_е (η_e) процесса производства. Его величина для процесса производства АБС составляет 4÷8%. Меньшая цифра относится к заводам РБ, большая – к заводам технически передовых стран. На рис.7.1 приведены значения эксергетического КПД ряда технических систем (ТС). Из рисунка видно, что термодинамическая эффективность процессов различна и колеблется в широких пределах. Их сравнение позволяет сделать вывод, что такой крупнотоннажный процесс, каким является производство АБС, крайне несовершенен с позиций энергетики. Данный вывод справедлив как для АБЗ Белоруссии, так и для заводов технически передовых стран. Производство АБС значительно уступает большинству крупнотоннажных процессов, таких как азотная и серная кислоты, едкого натра и хлора.

Детальный анализ производства АБС позволяет найти причины эксергетических потерь: использование высокопотенциальных первичных энергоресурсов для обеспечения технологического процесса с относительно невысокой температурой операции. Борьба с указанной причиной можно на базе рассматривавшегося выше энерготехнологического подхода.

В конкретном случае производства АБС, предлагается, строго говоря, комбинированная выработка электроэнергии и тепловая подготовка МЗ к смешению. Простейшая схема соответствующей установки представлена на рис.7.9. В качестве ЭУ

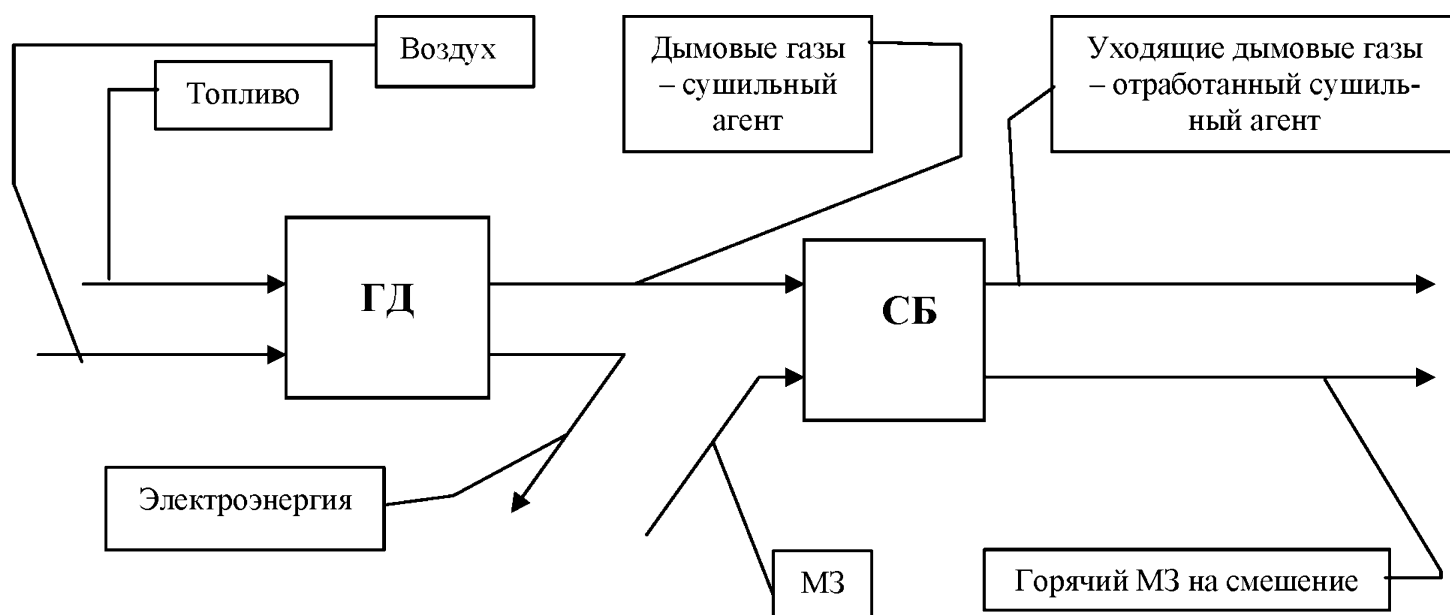


Рис.7.9. Принципиальная схема простейшей энерготехнологической установки по выпуску МЗ и электроэнергии: ГД – газовый двигатель; СБ – сушильный барабан; МЗ – минеральный заполнитель

используется двигатель с газообразным рабочим телом, который отличает высокие начальная и конечная температура рабочего тела в процессе расширения. И если первое является достоинством, то второе – недостатком двигателей с газообразным рабочим телом как тепловой машины. Но, с другой стороны, высокая температура дымовых газов, покидающих двигатель, позволяет их использовать как сушильный агент в процессе сушки в СБ. Очевидно, что понижение температуры дымовых газов до температуры СА происходит в результате процесса расширения и совершения полезной работы, что и обеспечивает совокупный эффект. В качестве газового двигателя (ГД) может использоваться газотурбинная установка (ГТУ) или дизельный двигатель. Данные ГД имеют начальную температуру $\sim 1,2 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом конечная температура составляет $400 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Учитывая то обстоятельство, что, согласно

многочисленным испытаниям СБ на заводах РБ, коэффициент избытка воздуха в СА имеет порядок $4 \div 5$, чему соответствует температура дымовых газов $500 - 600^\circ\text{C}$, нет проблем по параметрам дымовых газов, покидающих ГД при их использовании в роли сушильного агента СБ на АБЗ.

Гамма типоразмеров ГД такова, что требуемый набор мощностей до 2,5 МВт могут быть обеспечены дизельными двигателями. Мощности более 1 МВт обеспечиваются с помощью ГТУ. Таким образом, в диапазоне мощностей от одного до двух с половиной мегаватт возможен выбор между ГТУ и дизелем. Достоинство первых в высокой удельной мощности, недостаток – в необходимости обеспечения стабильного значения величины нагрузки и в наличии природного газа высокого давления. Достоинство дизелей в возможности работать на природном газе любого давления и в возможности изменения величины нагрузки, недостаток – большая удельная масса двигателя. На базе тех и других сегодня промышленность выпускает комплектные электростанции, отвечающие всем высоким современным потребительским требованиям.

Энергия, подводимая с топливом ГД, распределяется в первом приближении так: (25 – 30)% - производство электроэнергии, (65 - 60)% - энергия отходящих дымовых газов, 10% - рассеивается в окружающую среду. Расчеты показывают, что эксергетический КПД предлагаемой комбинированной установки производства электроэнергии и нагрева МЗ составляет более 30%. Такое значение η_e соответствует лучшим технологическим процессам. Что это дает в изменении привычных энергетических характеристик, показывают следующие оценки.

Расход энергии на подготовку тонны МЗ в СБ составляет примерно $\approx 3,1 \cdot 10^2$ МДж, что в пересчете на тонну АБС равно $2,7 \cdot 10^2$ МДж. Общий расход энергии на производство электроэнергии и нагрев МЗ в пересчете на тонну АБС составит в зависимости от КПД ГД $(3,6-7,2) \cdot 10^2$ МДж, с учетом подготовки битума получаем $(4,3-7,9) \cdot 10^2$ МДж. При этом, кроме тонны АБС производится электроэнергия в количестве до $2 \cdot 10^2$ МДж или $\sim (1 \div 6) \cdot 10^1$ кВт·часов. Вопрос разделения общих энергозатрат между различными продуктами, выпускаемыми совместно, является определяющим и не имеет однозначного решения. В то же время, от него во многом зависит оценка и дальнейшая судьба соответствующего технического решения. В этой

связи, дадим два варианта решения: один более понятный и приемлемый для технологов, другой – для энергетиков.

В первом варианте, будем считать, что электроэнергия вырабатывается по себестоимости ее в энергосистеме РБ. При средней по энергосистеме удельной выработке электроэнергии в 268 грамм условного топлива на кВт·час, с учетом потерь в электросетях при транспорте электроэнергии ее потребителю, составляющих 5 %, с учетом величины топливной составляющей себестоимости электроэнергии 70%, себестоимость, выраженная в количестве условного топлива, получается $4 \cdot 10^2$ г/кВт·час. Исходя из этого, находим, что для выпуска, упомянутых выше (20 – 60) кВт·часов, в итоге требуется (8 – 24) кг условного топлива или $(2,4 – 7,0) \cdot 10^2$ МДж энергии. Тогда на производство тонны АБС затраты составляют около $\approx 1 \cdot 10^2$ МДж. Это не только меньше на 50% того, что сегодня имеют лучшие АБЗ технически передовых стран, но и меньше теоретического расхода энергии на получение АБС без потерь, который можно оценить, в зависимости от влажности МЗ, около $2 \cdot 10^2$ МДж. Энергетическая составляющая себестоимости АБС уменьшается с сегодняшних 20% до 5%. Срок окупаемости установки, согласно оценкам, близок к 3,5 сезонам работы АБЗ.

Во втором варианте, на долю АБС отнесем $3 \cdot 10^2$ МДж затрат энергии, что соответствует лучшим мировым АБЗ. Тогда на выпуск одного кВт·часа электроэнергии приходится в пересчете на условное топливо $\sim 1,5 \cdot 10^2$ грамм против $2,7 \cdot 10^2$ грамм в энергосистеме. Напомним, что для ТЭЦ данный показатель соответствует величине порядка $\sim 1,8 \cdot 10^2$ грамм. Распределенные генерирующие мощности не требуют дополнительных линий электропередачи и прочего оборудования, уменьшают потери в электросетях на вышеупомянутые 5%. Общее потенциальное количество электроэнергии, вырабатываемое за сезон, оценивается в 10^8 кВт·часов. При этом, график ее производства может быть адаптирован к нуждам энергосистемы, в частности, участвовать в покрытии пиков электропотребления. Общая суммарная электрогенерирующая мощность АБЗ в РБ оценивается $5 \cdot 10^2$ МВт, что составляет около 25% от величины возрастания нагрузки в часы максимума электропотребления. Таким обра-

зом, и в отношении энергетики для РБ энерготехнология обещает существенную выгоду, как в экономии топлива, так и в смягчении режима работы электростанций.

Третий момент, который появляется в связи с энерготехнологической перестройкой АБЗ, возможное коренное изменение структуры АБЗ. В частности, оказывается вполне целесообразным отказ от введения в состав оборудования АБЗ котельных и парового хозяйства, поскольку себестоимость электроэнергии, вырабатываемой комбинированно с АБС, оказывается сравнимой со стоимостью энергии пара котельной. Это снижает капитальные затраты для вновь вводимых АБЗ, повышает культурный уровень производства, так как возможности электроэнергии в плане удобства использования несопоставимы. Устранение потребности АБЗ в котельной изменяет представление об их мобильности, позволяет изменить частоту расположения АБЗ на территории, и в конечном итоге, уменьшить плечо автоперевозок продукции и сырья. Учитывая структуру энергозатрат в производстве асфальтобетонного покрытия (2,5% - укладка и уплотнение, 38% - приготовление АБС на АБЗ, 58% - транспортирование АБС на место укладки при расстоянии перевозки до 20км), можно надеяться на дальнейшее существенное снижение энергозатрат.

Недостатком схемы (рис.7.9) является абсолютная зависимость теплотехнологического процесса от ГТУ, что малоприемлемо по многим причинам. Кроме того, в ней невозможно оптимизировать процесс за счет изменения температуры и состава входного потока СА. Указанные недостатки устраняются изменением схемы. Один из вариантов изменения представлен на рис.7.10. Для схемы рис. 7.10 возможны два крайних режима работы, в которых она трансформируется в:

- предыдущую утилизационную схему, когда все топливо поступает в ГТУ и дополнительный поток топлива в СБ отсутствует;
- привычную для технологов схему, когда все топливо поступает в СБ, а ГТУ отключено.

Эта схема, кроме того, позволяет обеспечить параметры сушильного агента перед СБ на предусмотренных конструкцией уровне, обычно 900 °С. Естественно, в этом случае экономические показатели несколько снижаются, но, что более важно, сохраняются условия работы сушильно-нагревательного барабана.

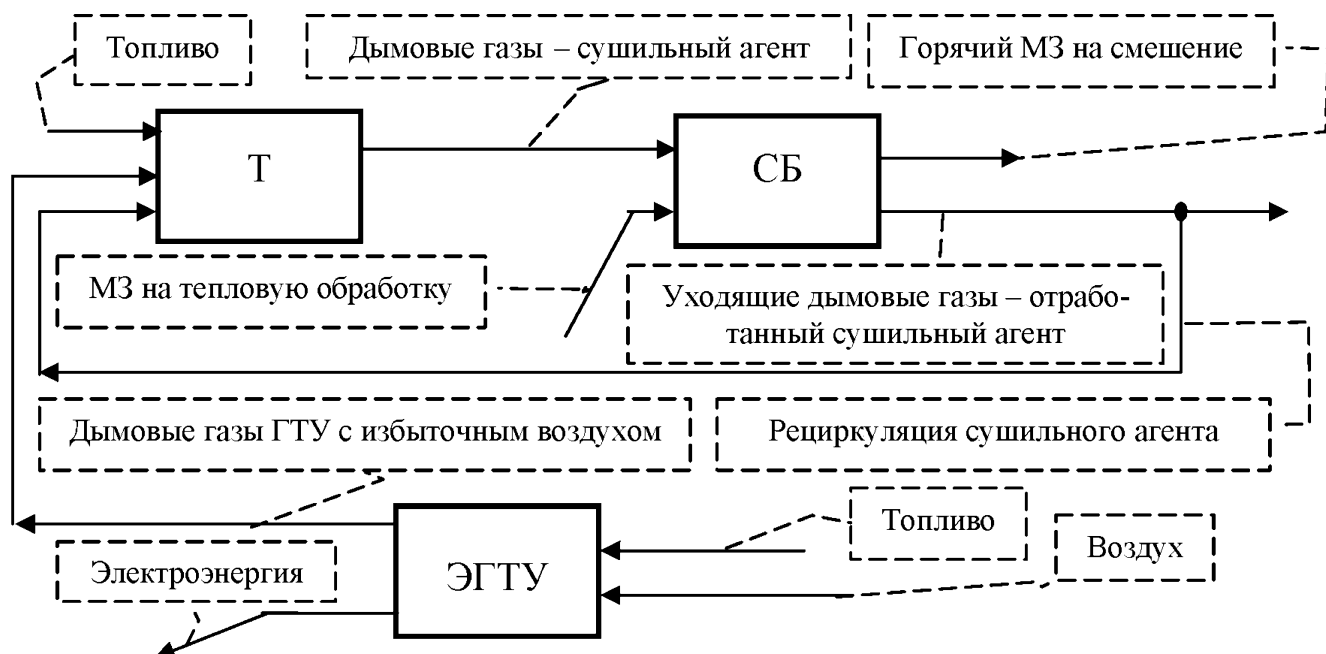


Рис. 7.10. Принципиальная схема простейшей энерготехнологической установки по выпуску МЗ и электроэнергии с возможностью работы без ГТУ и оптимизацией параметров по минимуму энергозатрат: Т – топка; ЭГТУ – газотурбинная комплектная электростанция; СБ – сушильный барабан; МЗ – минеральный наполнитель.

Естественно необходима оптимизация режима между двумя этими крайностями по минимуму энергозатрат изменением температур в СА, избытка воздуха в СА и пр. Ценой за полученную гибкость является некоторое снижение эксергетического КПД системы.

В качестве примера описанного энерготехнологического обеспечения процесса тепловой обработки минеральных можно привести проект завода производительностью 240 тонн АБС в час для обеспечения нужд г. Минска. На рис.7.11 показано соединение традиционного сушильно-нагревательного барабана с комплектной газотурбинной электростанцией. Сопоставление ее со схемой, приведенной на рис.7.7 позволяет судить об отсутствии каких-либо существенных изменений в конструкции СБ, что облегчает указанную энерготехнологическую реструктуризацию энергообеспечения теплотехнологического процесса подготовки минеральных наполнителей.

Согласно рекламному проспекту Германской фирмы поставляющей АБЗ, на тонну АБС расходуется непосредственно в СБ 7,8 кубических метров природного газа или $1,87 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$. Завод комплектуется газотурбинной установкой мощностью 2,5 МВт, производства Запорожского ОАО "Мотор-Сич" или Николаевского

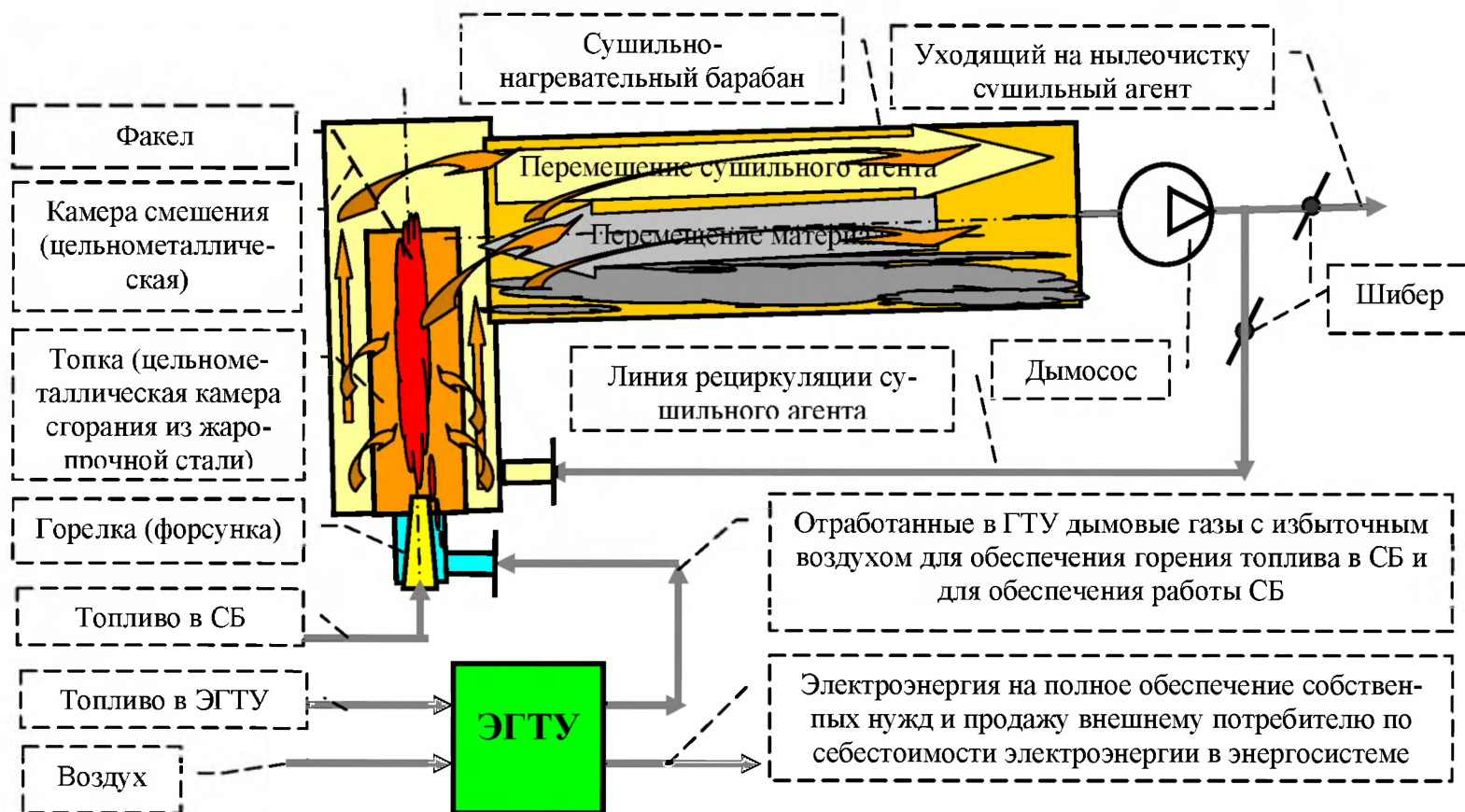


Рис.7.11. Схема сушильно-нагревательного устройства с энерготехнологической организацией процесса тепловой обработки минерального заполнителя

НПП "Машпроект". Стоимость указанной комплектной газотурбинной электростанции (ЭГТУ) первого производителя 650 тыс. \$ США. (Стоимость АБЗ \approx 1,5 тыс. \$ США). Окупаемость энерготехнологической реструктуризации около 3,3 сезонов. Произведем несложные расчеты.

В энерготехнологическом варианте, при сохранении принятого режима работы СБ, природный газ подается в ЭГТУ в количестве $1,05 \cdot 10^3$ м³/час и дополнительно в СБ в количестве $1,08 \cdot 10^3$ м³/час. Всего требуется природного газа $2,13 \cdot 10^3$ м³/час, что превышает потребность обычного режима на $0,26 \cdot 10^3$ м³/час или 14%. (Аэродинамический режим СБ без изменений, так как расход сушильного агента через барабан остается прежним, поскольку изменяется необходимая пропорция в воздухе и газах рециркуляции из-за охлаждения газов в процессе адиабатного расширения и совершения полезной работы в турбине ГТУ.) ЭГТУ ежечасно вырабатывает 2500 киловатт-часов или, при $2 \cdot 10^3$ часов работы в сезон, 5 млн. кВт·ч электроэнергии ежегодно. Используя приведенные выше данные стоимости электроэнергии в энергосистеме РБ, на 2500 киловатт-часов списывается $2500 \cdot 0,4 = 1000$ кг условного топлива или $1000 \cdot 29,3/35,8 = 818$ м³/час природного газа. На АБЗ остается $2,13 \cdot 10^3 -$

$818 = 1311 \text{ м}^3/\text{час}$. На тонну АБС получаем $5,6 \text{ м}^3$ против $7,8 \text{ м}^3$, прямое снижение удельных затрат топлива составляет $2,2 \text{ м}^3$. Учитывая произведенную электроэнергию по цене $0,4 \text{ кг у.т. за один кВт}\cdot\text{ч}$ в количестве $10,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на тонну АБС, из которых $\sim 25\%$ идет на нужды АБЗ, оставшиеся 75% продается, что дает снижение удельного расхода топлива $10,4 \cdot 0,4 \cdot 0,75 = 3,12 \text{ кг у.т. на тонну АБС}$ или $2,55 \text{ м}^3/\text{т}$. Таким образом, получаем удельный расход топлива на тонну АБС $5,6 - 2,55 = 3,05 \text{ м}^3$. При этом электроэнергия для самого АБЗ – "бесплатная". Снижение составляет $7,8 - 3,05 = 4,75 \text{ м}^3/\text{т}$ или 61% . Если учесть стоимость электроэнергии собственных нужд, по цене равной ее себестоимости в энергосистеме, без "накруток", получаем удельный расход газа $2,2 \text{ м}^3$ на тонну АБС. Экономия составляет $7,8 - 2,2 = 5,6 \text{ м}^3/\text{т}$ или 72% . Именно эту цифру и надо использовать в оценке экономии. В час получаем экономию $5,6 \cdot 240 = 1344 \text{ м}^3$, в сезон $1344 \cdot 10 \cdot 200 = 2688 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ газа или $3,28 \cdot 10^3$ тонн условного топлива, что стоит $196,8$ тыс. \$ США.

Одним из факторов, ухудшающим технико-экономические показатели, сдерживающим интеграцию ЭГТУ в систему энергообеспечения ряда теплотехнологий, является ограниченное число часов работы основного оборудования в течение года. Это, например, и отопительные котельные, работа которых оценивается в году $4 \cdot 10^3$ часами работы, и асфальтобетонные заводы, имеющие эту характеристику на уровне $2 \cdot 10^3$ часов. Вместе с тем, общепринято технико-экономическое обоснованное время $5 \cdot 10^3$ часов в году работы ЭГТУ в случае интеграции их в системы преобразования энергии. Не касаясь вопроса изменения этой величины в случае интегрирования ЭГТУ в теплотехнологические системы преобразования вещества, а она, как показывают оценки, уменьшается, отметим возможность достаточно простого разрешения указанной проблемы.

Для достижения заветного рубежа экономически выгодного числа часов использования ЭГТУ оказывается незаменимой способностью ЭГТУ к простому и быстрому переводу в режим транспортирования и непосредственно транспортированию. Некоторые заводы, например, ЗАО «Мотор-СІЧ» выпускают ЭГТУ в транспортном исполнении в том числе и в виде полуприцепов автопоездов. Используя сезонно ЭГТУ на одном объекте ее перемещают на другой объект, где в следующем сезоне того же года продолжается ее использование. Приобретая ЭГТУ на паритетных ус-

ловиях, определяемых годовым числом часов работы, можно сделать экономически выгодным их интеграцию с сезонно работающими теплотехнологическими системами.

Например, упомянутые выше отопительные котельные, эксплуатируемые в зимнее время, и асфальтобетонные заводы, работающие в летний период. Их совместное использование одной ЭГТУ увеличивает число часов ее работы в году без малого до $7 \cdot 10^3$. И если интеграция ЭГТУ с асфальтобетонным производством окупается примерно за четыре сезона, в данном случае срок окупаемости существенно сократится.

Интеграция ЭГТУ в теплотехнологию не требует ликвидации оборудования, обеспечивающего его работу в обычном режиме, как, впрочем, и не требует дополнительного оборудования, кроме самой ЭГТУ. Поэтому, возможные «перехлестывания» сезонов работы обоих теплотехнологических объектов, в структуру ТЭСПП которых интегрируется ЭГТУ, не создает никаких проблем, поскольку в эти относительно непродолжительные периоды их работа осуществляется в автономном режиме без ЭГТУ.

Объединение различных производств в использовании общей ЭГТУ расширяет число объектов, где создание энерготехнологических ТЭСПП целесообразно не только с энергетической точки зрения, но становится экономически оправданным. Единственными сдерживающими фактором подобных высокоэффективных объединений, являются психологический и межведомственный барьеры, преодолеть которые должно, в том числе, и с помощью Государственного комитета по энергосбережению и энергетическому надзору.

Хотелось бы еще раз подчеркнуть целесообразность сопоставления для каждого конкретного случая вариантов применения дизельной и газотурбинной электростанций. Возможность применения разного топлива, газа низкого давления, колебания нагрузок делает дизельные электростанции для условий АБЗ весьма перспективными, поскольку они находятся в требуемом диапазоне мощностей.

Заключительный этап модернизации должен состоять в полной автоматизации АБЗ на современной элементной базе промышленных компьютеров. Это позволит

вести динамическое регулирование работы АБЗ в зависимости от всего комплекса изменяющихся параметров по минимуму энергопотребления.

Введение в схему АБЗ термосов накопления горячего МЗ, упоминаемых в данной работе ранее, раздвигает временные рамки производства продукции до полных суток, уменьшает в 2-3 раза размеры и мощность СБ, увеличивает загрузку оборудования.

Принципиальная структурная схема такого АБЗ представляется следующей, рис. 7.12. На ее примере видно как системная рационализация энергопотребления радикально изменяет структуру производства АБС. Происходит качественное снижение энергопотребления, повышение культуры производства и потребительских свойств продукции, снижение до минимума экологического ущерба. При этом, возникает обратное воздействие производства АБС на энергетику РБ, что усиливает общую пользу для страны.

Наконец, совокупное снижение потребления энергоресурсов многократно снизит вредную нагрузку АБЗ на окружающую среду, упростит очистку выбросов и позволит превратить АБЗ в современное экологически менее вредное производство.

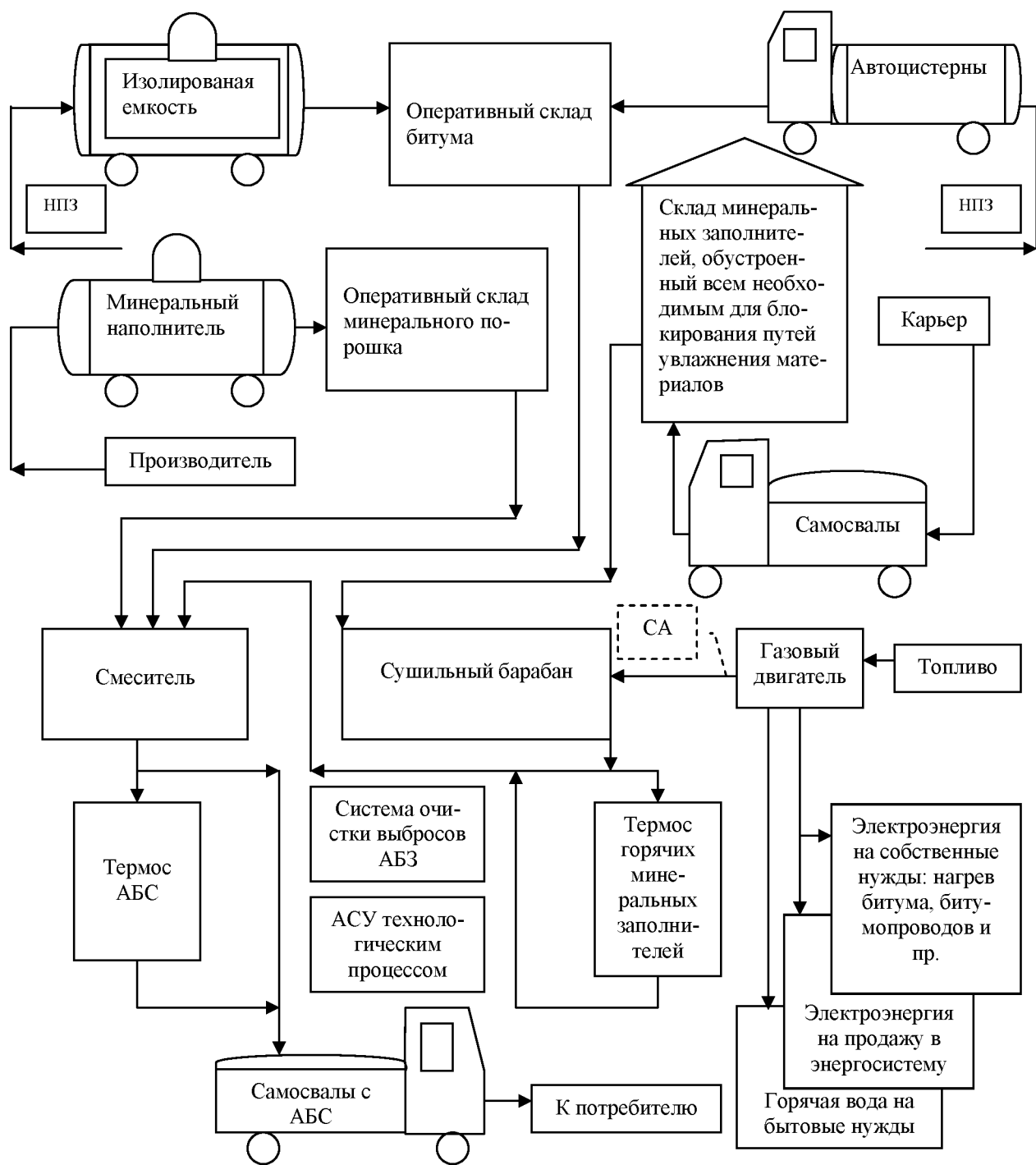


Рис. 7.12. Принципиальная схема АБЗ с измененной структурой

7.2. Энергообеспечение производства железобетонных изделий

Касаясь рационального энергоиспользования в этой отрасли, следует проблему разделить на два аспекта. Первый связан с блокированием путей неоправданных трат энергии, вызванных отсутствием должной изоляции пропарочных камер, паропроводов, наличием мест, связанных с планировкой пропарочных камер, где скапливается конденсат, наконец, не всегда оправданным сбросом конденсата в дренаж. Например, ситуация, в которой на дне пропарочной камеры по какой-либо причине сохраняется слой конденсата толщиной 1 - 2 см, достаточно банальна. При площади камеры 25 м^2 на ее дне сохраняется масса воды около $5 \cdot 10^2 \text{ кг}$, требующая дополнительных затрат энергии на каждый технологический цикл около $1 \cdot 10^2 \text{ МДж}$, на выработку которых в котельной и доставку в камеру затрачивается около 150 кг условного топлива. В зависимости от загрузки камеры удельные затраты энергии возрастают до $4 \cdot 10^1\%$. Данные причины достаточно очевидны и потому менее актуальны для дальнейшего рассмотрения. Наибольшие возможности для радикального снижения удельного энергопотребления в данном случае связаны с рациональным энергообеспечением применяемых технологических процессов, учитывающем требования второго закона термодинамики.

При традиционном энергообеспечении пропарочной технологии производства железобетона имеют место колоссальные потери эксергии, оцениваемые величиной $9 \cdot 10^1\%$. Это связано с обеспечением крайне низкопотенциального процесса, температура которого очень близка к температуре окружающей среды, энергией получаемой из высокопотенциального топлива, поступающего в котельную. Следовательно, котельные, обеспечивающие работу заводов ЖБИ, должны быть переведены, во-первых, в режим мини-ТЭЦ, когда стоимость одной Гкал уменьшается с 3 на лучшей котельной до 2\$ за один ГДж (с 12\$ до 7,5\$ за Гкал). Сегодня необходимое оборудование для этого предлагается многими производителями энергетических установок. Однако, и этого сегодня уже оказывается недостаточно. Котлоагрегаты должны быть оборудованы высокотемпературными надстройками, благодаря чему стоимость производимой единицы тепловой энергии снижается еще в 1,5 – 2 раза.

Во многих случаях целесообразно организовать обеспечение паром процесса производства ЖБИ с помощью автономных установок генерирующих парогазовую смесь. Технологически это допустимо и энергетически достаточно выгодно, что подтверждено рядом исследований. Однако такие генераторы парогазовой смеси сегодня совершенно необходимо делать на основе газодизельных электростанций соответствующей мощности. В этом случае себестоимость получаемой единицы тепловой энергии в сравнении с традиционно вырабатываемой уменьшается на порядок. Подобную установку, принципиальная схема которой приведена на рис.7.13, отличает безопасность, простота конструкции и эксплуатации.

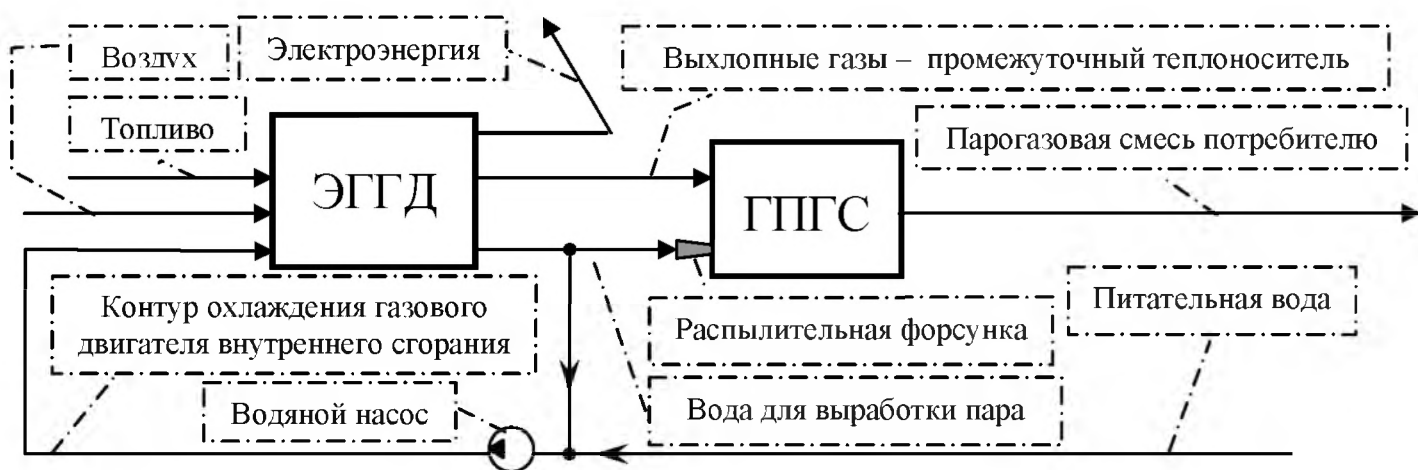


Рис.5.13. Принципиальная схема простейшей комбинированной парогазовой мини-установки: ЭГГД – электрогенератор с газовым двигателем внутреннего сгорания; ГПГС – контактный теплообменник – генератор парогазовой смеси.

Энергобаланс приведен на рис.7.14. Топливо, прежде всего, газообразное, используется в газовом двигателе для привода электростанции, например, мощностью 250 кВт. Энергия выхлопных газов позволяет при этом в час получить 2,6 ГДж (0,6 Гкал) тепловой энергии в виде энергии парогазовой смеси. Подобная тепловая мощность в ряде случаев вполне достаточна. Топливную составляющую единицы тепловой энергии в этом случае можно определить следующим образом. Для работы установки требуется около $1,2 \cdot 10^2$ кг условного топлива. В ходе ее работы вырабатывается 250 кВт·ч электроэнергии. Стоимость кВт·ч получаемой электроэнергии будем определять равной себестоимости ее в энергосистеме РБ, ранее она определена в единицах условного топлива, в 0,4 килограмма за киловатт-час. Исходя из этого, на производство 250 кВт·ч электроэнергии списывается 100 кг условного топлива. На 2,6 ГДж (0,6 Гкал) тепловой энергии остается, как нетрудно видеть, $2 \cdot 10^1$ кг ус-

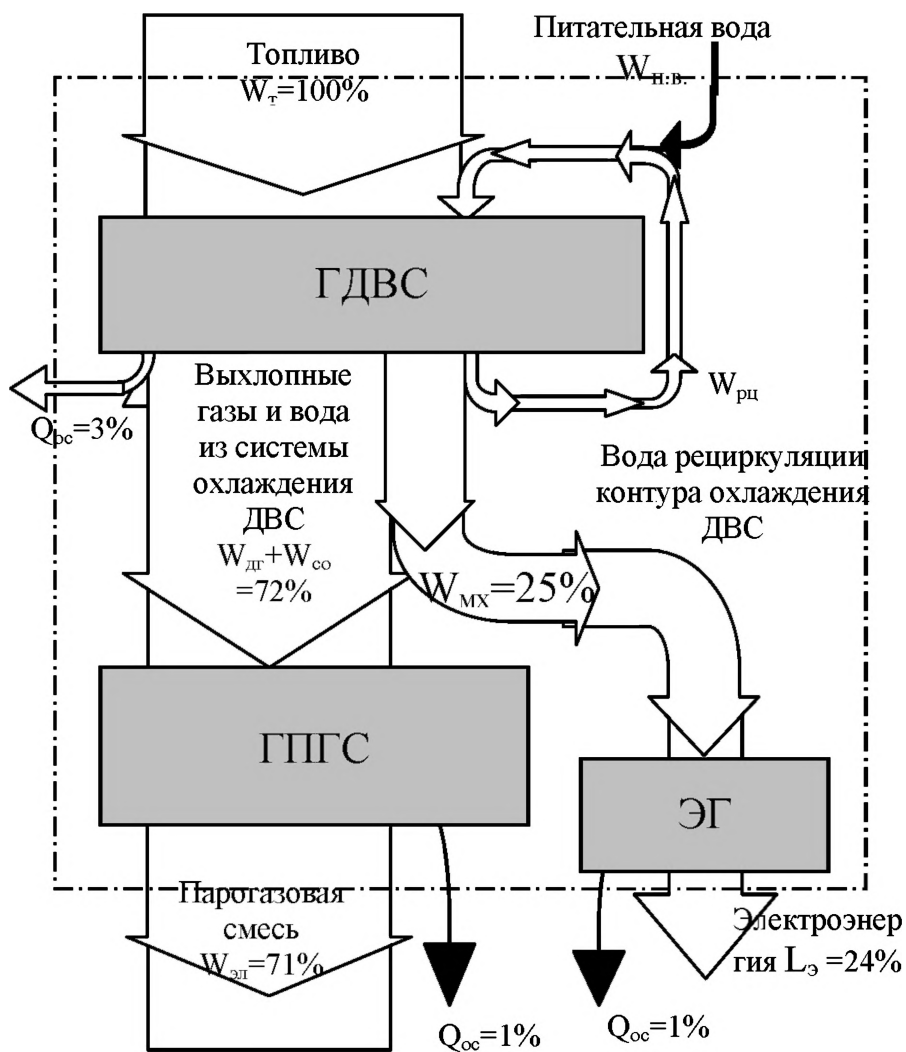


Рис. 7.14. Энергобаланс комбинированной с дизельной электростанцией парогазовой мини-установки: ГДВС – газодизель; ГПГС – генератор парогазовой смеси; ЭГ – электрогенератор; $Q_{ос}$ – рассеяние энергии в окружающую среду через конструкции в форме теплоты процесса охлаждения. Энергопотоки определены по отношению к энергии топлива, поступающего в установку, которая составляет в этом случае 100%

ловного топлива. Таким образом, топливная составляющая одной Гкал тепловой энергии оценивается в 33 кг условного топлива. Для сравнения напомним, что в лучших котельных она равна 175 кг, в идеальной виртуальной котельной, КПД которой составляет 100%, соответственно имеем 143 кг. Нетрудно оценить снижение удельных затрат энергоресурсов на пропарку железобетона. Снижение составит $8 \cdot 10^1$ %, т.е. в сравнении с вышеупомянутыми 0,8 – 0,5 ГДж/м³ (достигаемыми в комплексе с химическими добавками), получаем 0,16 – 0,1 ГДж/м³ (0,04 – 0,02 Гкал/м³).

При использовании жидкого топлива (дизельное топливо), стоимость которого намного превышает стоимость природного газа, картина в стоимостном выражении изменяется весьма сильно и требует в каждом конкретном случае дифференцированного подхода.

8. Экологические аспекты энергосбережения

Потребляемая человеком энергия влияет на естественные процессы, происходящие на нашей планете. Годовое потребление энергии на Земле достигло таких количеств, которые соизмеримы с протекающими в природе энергетическими процессами. Примерные значения мощности некоторых объектов и протекающих процессов приведены в таблице 8.1., рис.8.1. Обращает внимание доминирующая роль солнечного излучения в суммарном потоке энергии процессов окружающей среды.

Таблица 8.1

Ориентировочные значения мощности природных и искусственных процессов и объектов

Процесс или объект	Мощность, Вт	Процесс или объект	Мощность, Вт
1. Взрыв новой звезды	10^{39}	10. Все электростанции планеты	$4 \cdot 10^{12}$
2. Излучение сверхзвезды	10^{32}	11. Испарение с поверхности Земли	$0,5 \cdot 10^{12}$
3. Излучение Солнца	10^{27}	12. Все авиалайнеры	10^{11}
4. Излучение Солнца на Землю	$1,2 \cdot 10^{17}$	13. Все электростанции РБ	10^{10}
5. Взрыв водородной бомбы	10^{18}	14. Лукомльская ГРЭС	$2,4 \cdot 10^9$
6. Взрыв атомной бомбы	10^{15}	15. Мощная ЛЭП	10^9
7. Землетрясение	$(1,5 - 100) \cdot 10^{12}$	16. Электрическая лампа	$10^1 - 10^3$
8. Все установки, вырабатывающие энергию	$2 \cdot 10^{13}$	17. Муха	10^{-5}
9. Приливы морей и океанов	$(2 - 3) \cdot 10^{12}$	18. Радиосигнал, отраженный от Луны	10^{-18}

Общепризнанно, что антропогенное воздействие на окружающую среду достигло таких размеров, при которых начинается глобальное изменение климата, и дальнейшее существование человечества напрямую зависит от возможных неблагоприятных последствий. Очевидна надобность срочных изменений в различных аспектах деятельности людей, прежде всего, в сознании населения, во взглядах на соотношения биосферы и технического прогресса. В этой связи необходимо ознакомление с основными понятиями, относящимися к экологической стороне нашей жизни.

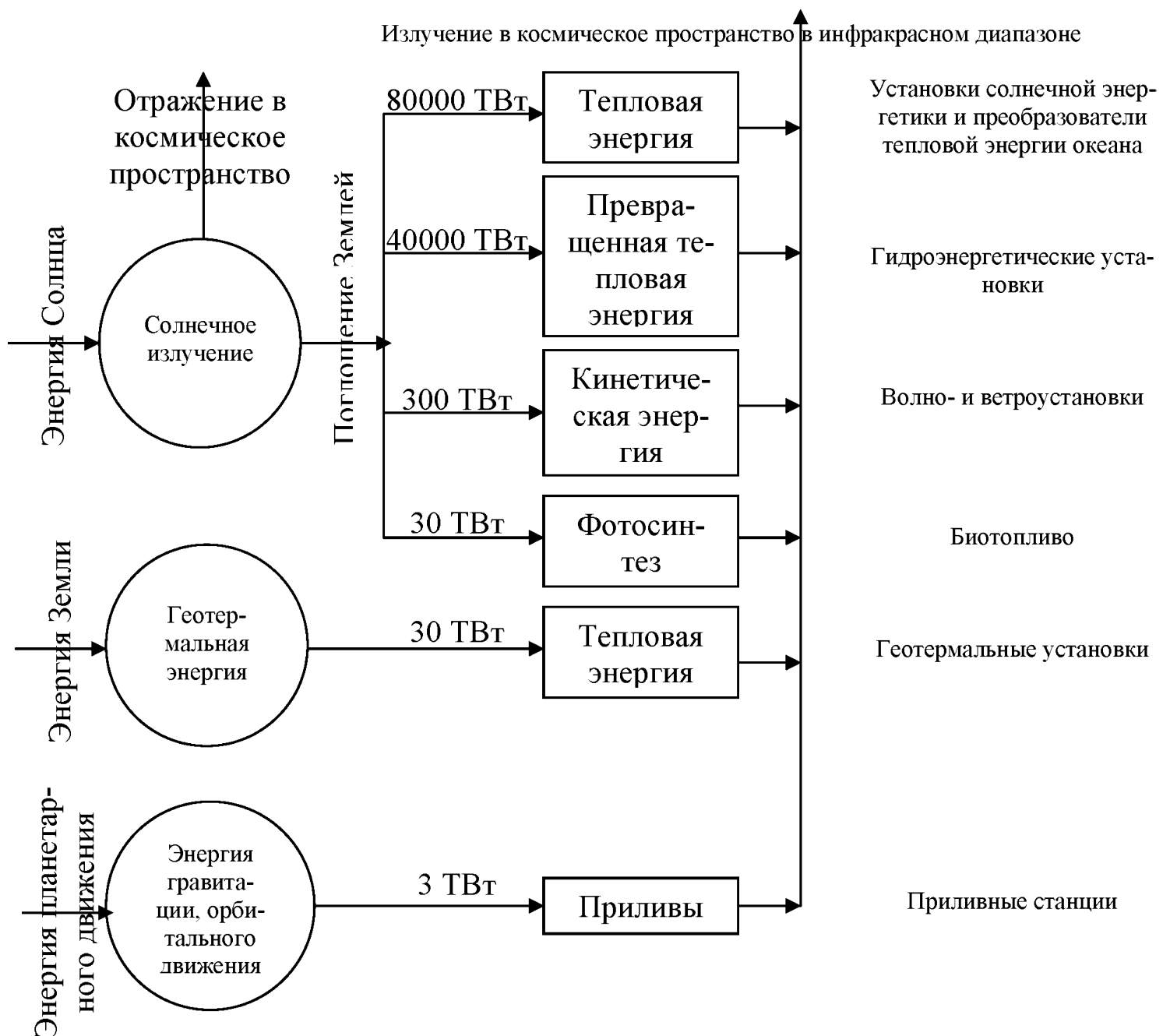


Рис.8.1. Энергия процессов, протекающих в окружающей среде и их использование.

Представление биосферы ввел великий русский ученый академик В.И. Вернадский. *Биосфера* – область части литосферы (суши), атмосферы и всей гидросферы (Мировой океан), занятая живым веществом. *Атмосфера (воздушный бассейн)* – слой газов, распространяющийся от поверхности Земли на несколько тысяч километров, следующий за суточным движением Земли. Большая ее часть сосредоточена в слоях до $5 \cdot 10^3$ метров от поверхности. Общая масса атмосферы оценивается в одну миллионную часть всей массы Земли и составляет не более $6 \cdot 10^{15}$ тонн. По объему атмосфера состоит из азота (79 – 80%), кислорода (20 – 19%), аргона, диоксида углерода, водяных паров и других элементов (всего до 1%). Атмосфера играет жизненно важную роль в биосфере: дыхание всего живого, защитный покров от резких

колебаний температуры, от воздействия смертоносного рентгеновского космического излучения и пр.

В результате протекания технологических процессов атмосфера загрязняется многими веществами и ингредиентами. Выбросы и их структура на территории Беларуси представлена рис. 8.2 – 8.5. Суммарные выбросы в атмосферу в 1998 году оцениваются в 1,8 миллионов тонн. Основной вклад в них составляют выбросы автотранспорта (77%), на долю стационарных источников приходится около 23%. Среди областей РБ наиболее неблагоприятное положение в Минской и Витебской областях. Несмотря на наметившуюся тенденцию к снижению выбросов (рис.8.5), сохраняется общая неблагоприятная ситуация.

До $8 \cdot 10^1$ % выбросов приходится на долю концернов «Белнефтехим» (23%), «Белэнерго» (22%), Министерства архитектуры и строительства (11%), Министерства жилищно-коммунального хозяйства (10%), Министерства промышленности (7%), Министерства сельского хозяйства и продовольствия (7%).

Среди предприятий наибольший вклад по выбросам имеют Новополоцкое ПО «Нафтан», Лукомльская ГРЭС, Мозырский НПЗ. От стационарных источников наибольшие выбросы по городам в 1998 году были в Новополоцке, Минске, Новолукомле, Гомеле.

Жизнедеятельность человека складывалась так, что он, как правило, не задумывался о последствиях. Когда его деятельность приводила к неблагоприятным изменениям в биосфере некоторых районов, происходило переселение в другие районы. Ограниченность территории, при этом, не ощущалась. Это было допустимо пока масштабы деятельности и потребляемые в ходе ее энергоресурсы, были несопоставимы с энергией явлений протекающих в природе.

По предварительным оценкам, предельно допустимое годовое потребление энергии всей цивилизацией на Земле составляет 3% энергии, поступающей на Землю от Солнца. Энергия всех видов энергоресурсов, потребляемых в настоящее время на планете в течение года, оценивается в $1,8 \cdot 10^{17}$ кДж и составляет 0,003% энергии Солнца, поступающей в течение года на Землю, величина которой составляет около $5,5 \cdot 10^{21}$ кДж.

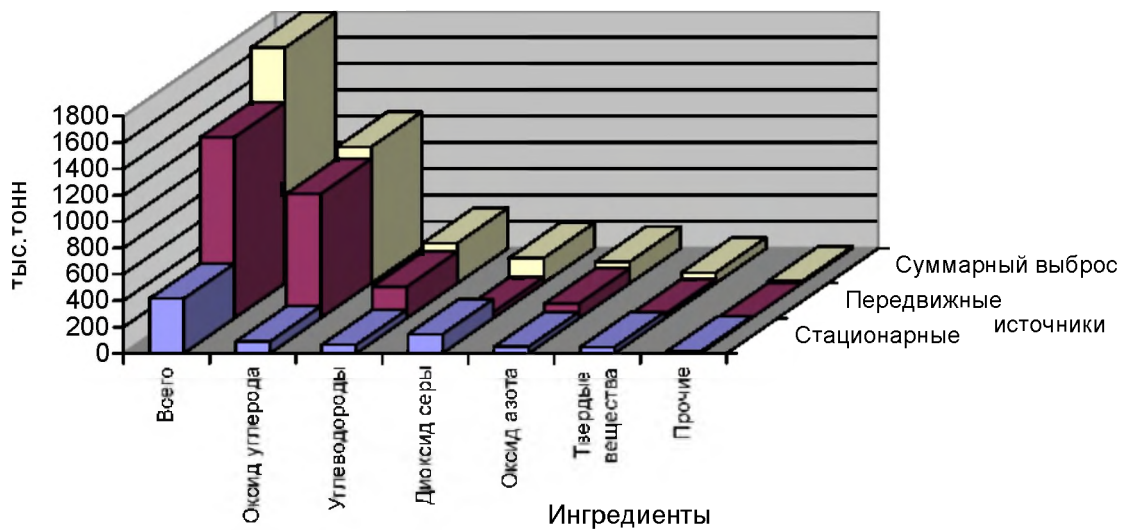


Рис.8.2. Выбросы вредных веществ в атмосферу в Республике Беларусь за 1998 год

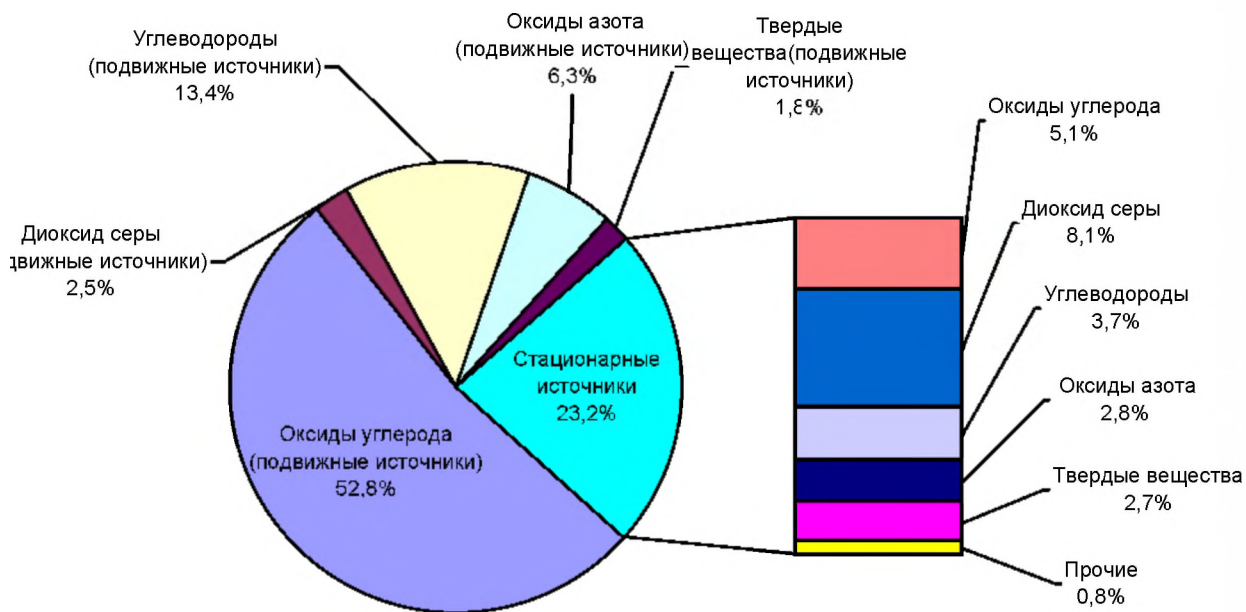


Рис.8.3. Структура выбросов в атмосферу РБ в 1998 году

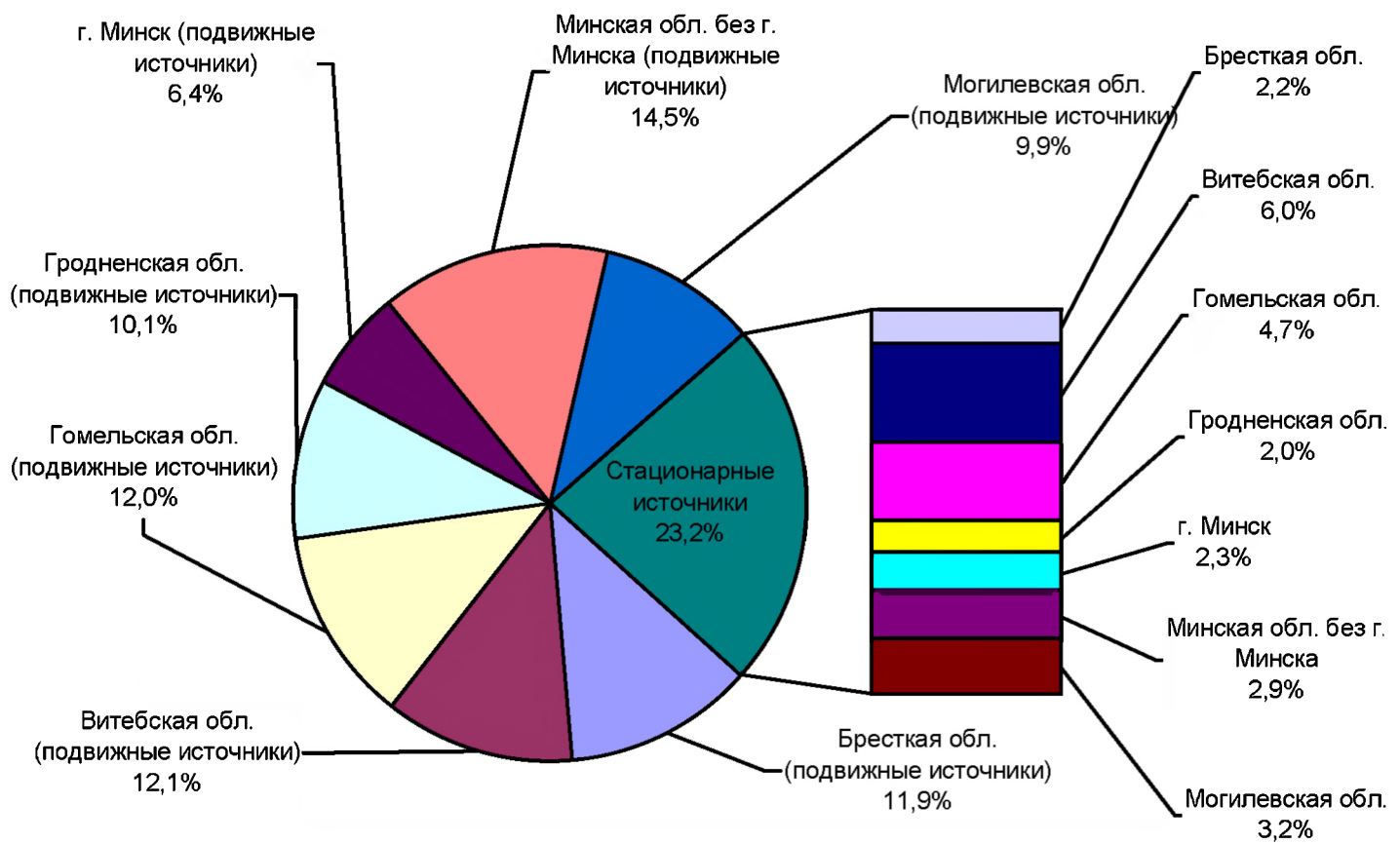


Рис.8.4. Структура выбросов в атмосферу РБ по областям в 1998 году

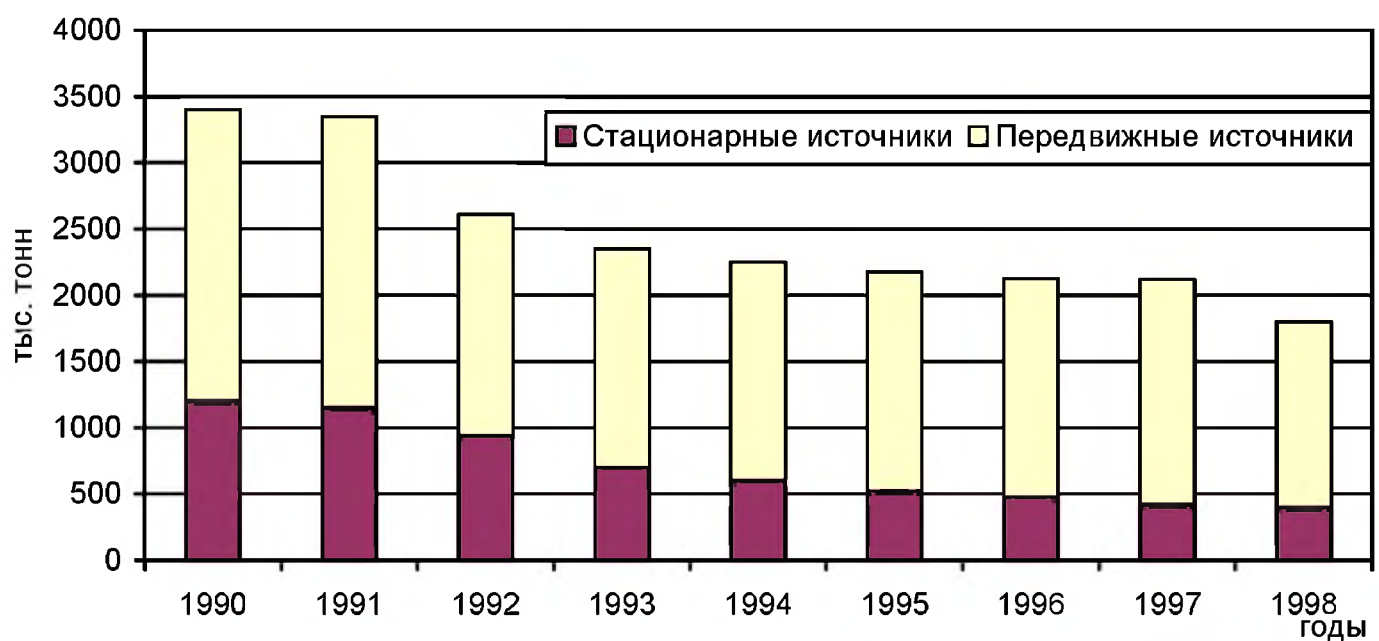


Рис.8.5. Динамика загрязнения атмосферы источниками РБ

Среднее годовое потребление энергии на человека на планете оценивается в ~ 0,03 ТДж. Однако, оно крайне неравномерно по отдельным странам:

в США оно на порядок выше, т.е. ~ 0,3 ТДж;

в РБ ~ 0,15 ТДж.

Средняя годовая мощность потребления энергии на человека на планете оценивается в 1 кВт, при высокой неоднородности этого показателя в различных странах: от 10 кВт в США, 4 кВт в Западной Европе до 0,1 кВт в ряде слаборазвитых стран.

Для оценки дальнейшего изменения потребления энергоресурсов на бытовые и хозяйственные цели можно прибегнуть к следующей простейшей модели. Потребность в энергии W сообщества из N человек и среднегодовой расход энергии на одного человека \bar{w} может быть определена

$$W = \bar{w} \cdot N. \quad (8.1)$$

Уровень жизни, зависящий сложным образом от \bar{w} , в первом приближении можно связать с величиной S национального дохода на душу населения

$$S = \eta \cdot \bar{w}, \quad (8.2)$$

где η – коэффициент, определяющий эффективность использования энергии.

Из обеих зависимостей следует

$$W = S \cdot N / \eta. \quad (8.3)$$

Население планеты сегодня оценивается 6 миллиардами и возрастает на 3% в год. Средние темпы роста национального дохода в мире не превышают 5%. Если постулировать постоянство коэффициента эффективности преобразования энергии η , ежегодное увеличение потребления энергии на планете, согласно соотношению 8.3 должно увеличиваться на 8%, что, надо признать, требует соответствующих мероприятий, в том числе и в экологическом аспекте.

Отрицательное влияние техногенной деятельности на биосферу связано, прежде всего, с расходом большого количества кислорода на осуществление процессов горения топлива и связанного с этим выбросом в атмосферу газов, получивших название «парниковых». Это газы, молекула которых содержит три и более атомов. Они пропускают электромагнитное излучение коротких длин волн и задерживают излучение в длинноволновом диапазоне. Тепловое излучение любого предмета имеет широкий спектр длин волн, но основная его энергия переносится волнами определенной длины. Эта длина зависит от температуры излучающего предмета, чем она выше – тем короче длина волн переносящих основную энергию излучения. По-

сколькo излучение поверхности Земли низкотемпературное ($\sim 2 \cdot 10^2 < T_{\text{пз}} < \sim 3,5 \cdot 10^2$ К, здесь $T_{\text{пз}}$, К – температура поверхности Земли), а излучение Солнца высокотемпературное (в центре его температура $\sim 20 \cdot 10^6$ К, на поверхности $\sim 6 \cdot 10^3$ К), «парниковые» газы пропускают энергию излучения Солнца на Землю и задерживают обратное излучение Земли в космическое пространство. В итоге происходит накопление энергии внутри системы и ее разогрев (подобно парнику, что и дало название газам и всему эффекту. 25% выбросов всех газов, приводящих к парниковому эффекту на планете, приходится на США). Повышение средней температуры на Земле даже на доли градуса чревато весьма и весьма серьезными последствиями.

На Земле ежегодно выбрасывается в атмосферу в результате деятельности человека: диоксида углерода $\sim 0,4 \cdot 10^3$ млн. тонн, диоксида серы $\sim 0,2 \cdot 10^3$ млн. тонн, оксидов азота $\sim 0,06 \cdot 10^3$ млн. тонн (Отметим, что оксиды азота обладают канцерогенными свойствами. Их выброс в атмосферу регламентирован: в РБ не выше $0,085 \text{ мг/м}^3$, в США до $1,0 \text{ мг/м}^3$), углеводородов $\sim 0,09 \cdot 10^3$ млн. тонн, пыли $\sim 0,4 \cdot 10^3$ млн. тонн. Выбросы пыли при извержении вулканов сопоставимы, поскольку на порядок превышают приведенные выше цифры. Запыленность атмосферы Земли крайне неравномерна: над океаном в 1 см^3 содержится $\sim 0,5 \cdot 10^3$ пылинок, над городами на два порядка больше $\sim 10^5$.

Вредное воздействие техногенной деятельности человека связано и с водоемами, куда идет сброс охлаждающей воды, например, ряда тепловых электростанций. Тепловое загрязнение водоемов дополняется загрязнением химическим, бактериологическим и пр. в результате сброса сточных вод предприятий и городов, что пагубно для гидросферы, для всего живого.

Использование твердого топлива, а это, прежде всего, уголь, сопровождается радиоактивным заражением местности, образованием больших золоотвалов, увеличением выбросов диоксида углерода (CO_2) в 1,7 раза в сравнении с природным газом и увеличению в $5 \cdot 10^1$ раз токсичности выбросов, что вызовет серьезные экологические последствия. Надо помнить о неизбежном подорожании электроэнергии на порядок в сравнении с использованием газового топлива. В качестве иллюстрации можно привести такие факты:

– Тепловая электростанция мощностью 1 ГВт ежегодно образует до миллиона кубических метров золы, для размещения которой слоем толщиной в один метр требуется площадь в один квадратный километр.

– Радиационный годовой суммарный выброс тепловых электростанций Кемеровской области, работающих на угле, превышает радиационную нагрузку отходов атомных станций, которые планируются ввезти для переработки на соответствующих предприятиях России.

– В США, где в структуре электрогенерирующих мощностей большую часть занимают угольные станции, себестоимость электроэнергии намного выше из-за очистных мероприятий. Тем не менее, половина озер США практически мертвы, поскольку в них не может жить рыба.

Серьезность проблемы энергопотребления, таким образом, многогранна. Она должна рассматриваться, по меньшей мере, в трех аспектах: техническом, социально-политическом и экологическом (биосферном). Очевидно, что цивилизация подошла к критической черте, когда еще есть время поправить положение. Этим и объясняется необходимость образованности современного человека в вопросах энергоиспользования. КПД изымаемых у природы ежегодно $5 \cdot 10^1$ млрд. тонн условного топлива не превышает 0,2%. Увеличение его – важнейшая техническая задача, влияющая и на экологический аспект энергоиспользования. Решение ее тесно переплетается с разумным энергопотреблением каждым членом сообщества на своем уровне возможностей, т.е. является и социальной проблемой.

Связи процессов энергопотребления с биосферой сложны и многообразны (рис.8.6). Сложность энергетической системы и протекающих в ней процессов (рис.8.7) требует крайне взвешенного подхода к ее развитию вообще и реструктуризации в частности. Заключение по тем или иным ее подсистемам (рис.8.8) должны приниматься в совокупности с многими другими факторами различных аспектов проблемы.

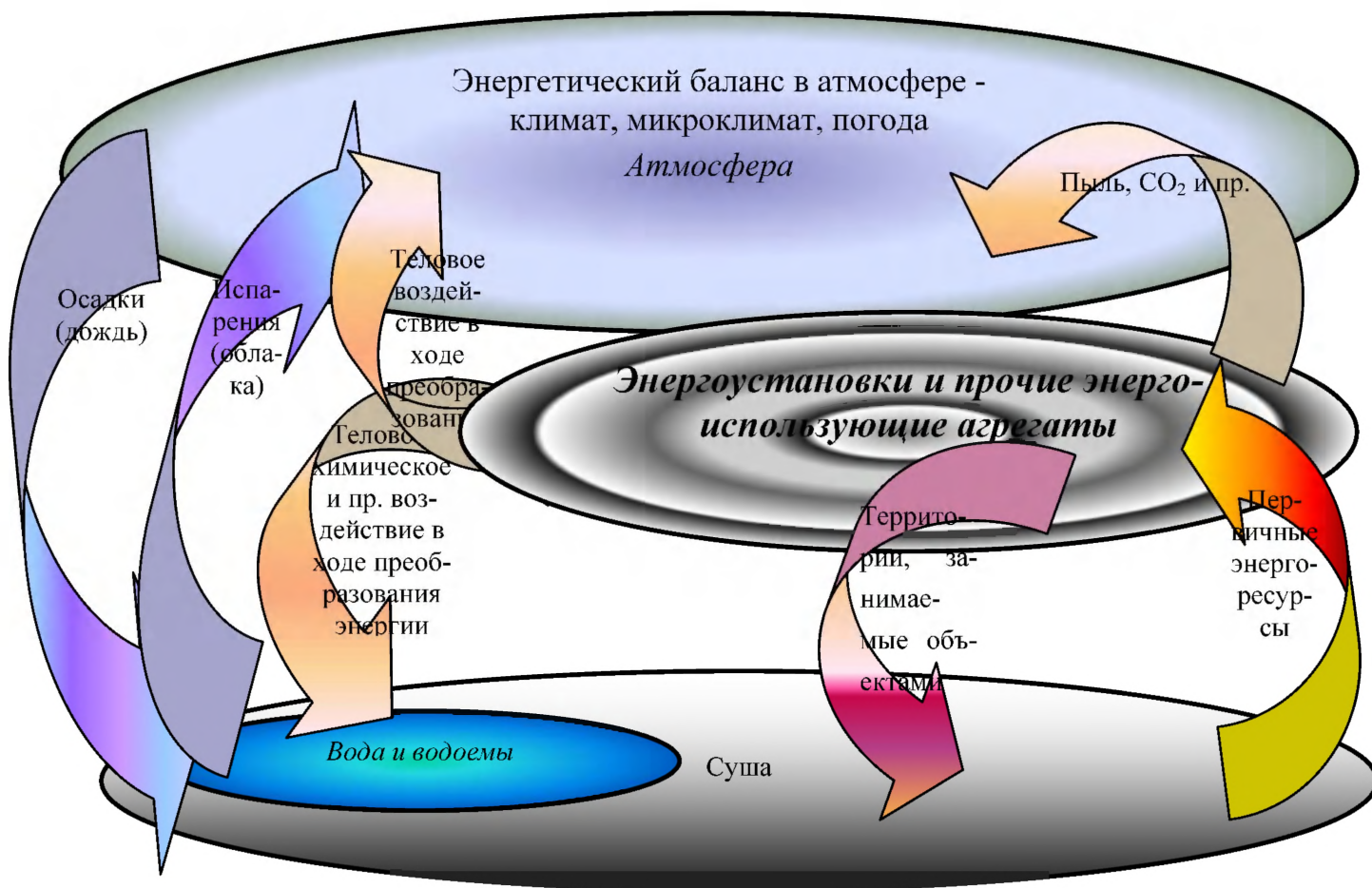


Рис.8.6. Схема связей энергопотребляющих установок с биосферой

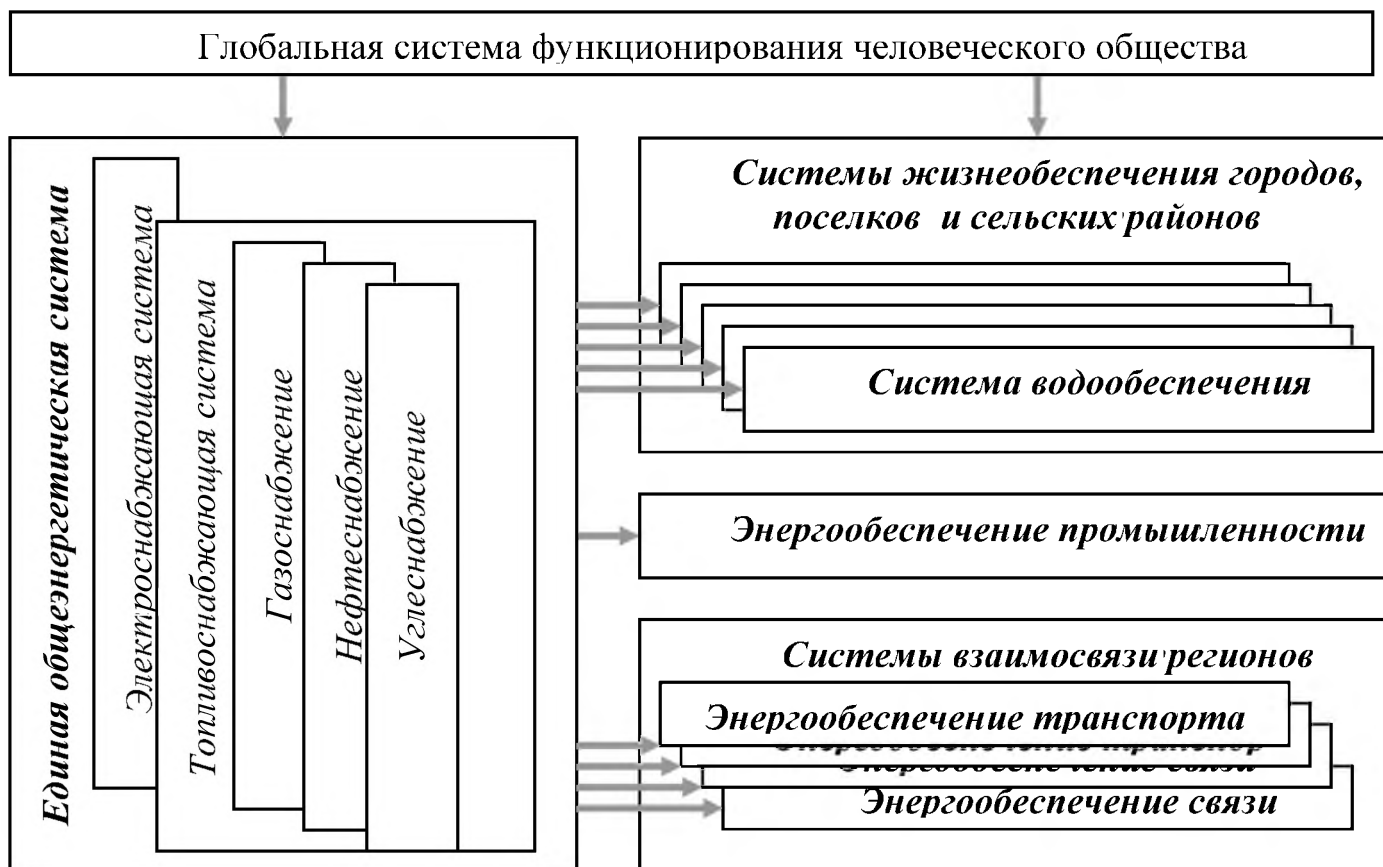


Рис.8.7. Структурная схема энергосистемы и ее связи с другими системами

Суточные воздействия электростанции мощностью 1 ГВт

(приведены в тоннах, кроме радиоактивности выбрасываемых элементов (РЭ))

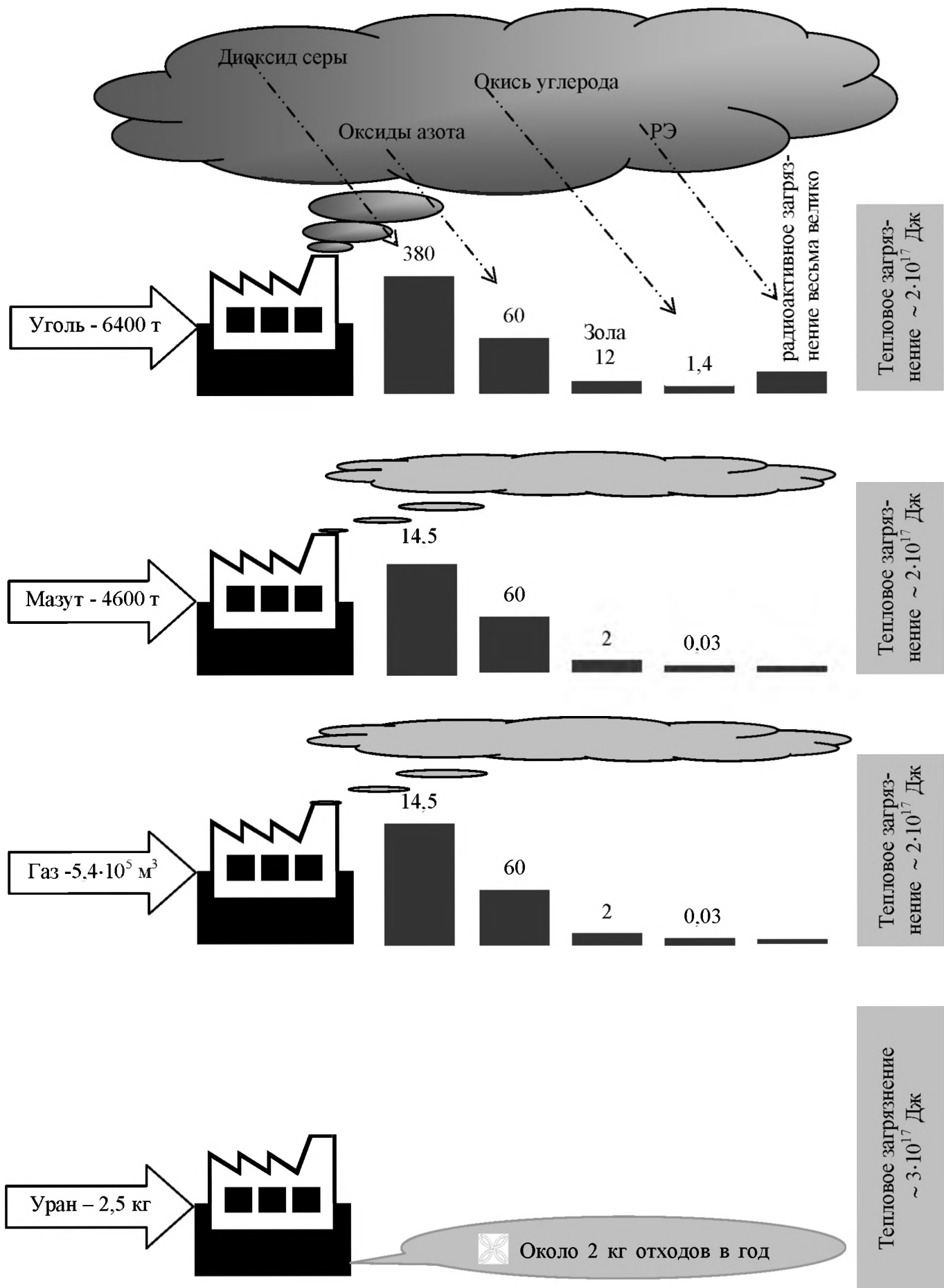


Рис.8.8. Показатели загрязнения от различных электростанций

9. Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии

Все источники энергии можно разделить на две группы, сравнительные характеристики которых даны в таблице 9.1, а сами группы составляют:

- 1) природные ископаемые запасы веществ, химическая или ядерная энергия которых используется в традиционной энергетике. Запасы этих веществ в природе истощаются и, в конечном итоге, исчезают. Последнее определило название этих "первичных" источников энергии "невозобновляемые", "истощаемые", "традиционные";
- 2) природные процессы, протекающие в природе постоянно с той или иной повторяемостью вне какой-либо связи с деятельностью человечества. Связаны они, прежде всего, с энергией солнечного излучения, поступающего на планету. Эти процессы, в определенном смысле, возобновляемы, что дало название "возобновляемые источники энергии". Смысл приведенной классификации поясняют схемы на рис.9.1.

При возрастающем спросе на топливо, росте населения и требований к уровню жизни становится все более очевидным, что развитие общества в долгосрочной перспективе невозможно без широкого использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Огромные потенциальные ресурсы, неистощимость, достаточно высокая экологическая чистота, сохранение термодинамического равновесия в энергетическом балансе планеты

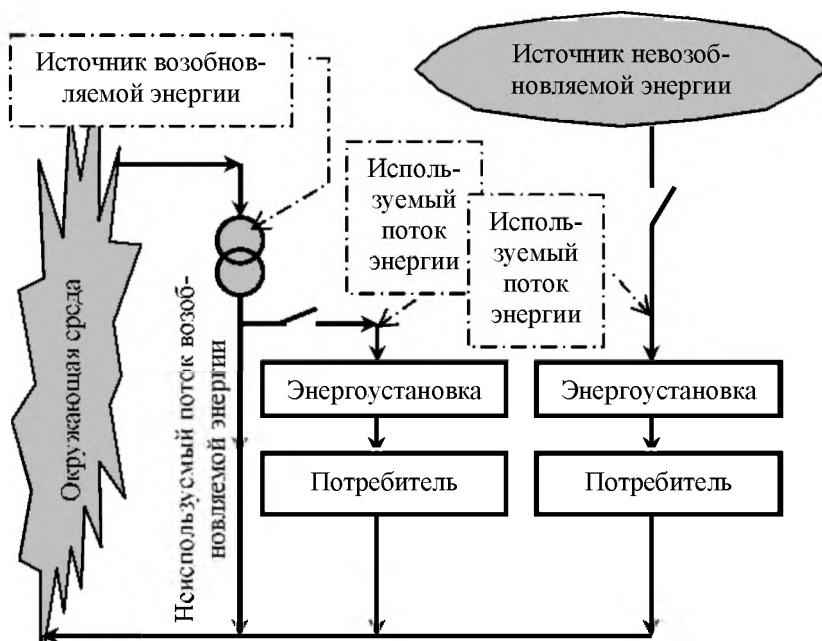


Рис.9.1. Схема процессов использования возобновляемой и невозобновляемой энергии

независимо от масштабов использования – все это делает весьма заманчивым их освоение. Во всем мире активизированы научные исследования и практические работы в области освоения ВИЭ по таким направлениям: солнечная энергия, геотермальная энергия, ветровая энергия, энергия органических

Таблица 9.1

Сравнительная характеристика энергоисточников, использующих две различные группы энергоресурсов: традиционные первичные ископаемые энергоресурсы и возобновляемые энергоресурсы

Показатели группы	Группа	
	Возобновляемые	Традиционные
Примеры источников	Солнце, приливы, ветер, геотермальная энергия	Уголь, нефть, газ, ядерное топливо
Естественная форма существования	Потоки энергии	Химическая энергия, Ядерная энергия
Начальная интенсивность	Низкая интенсивность, рассеянная энергия с плотностью не выше 300 Вт/м^2	Высокая интенсивность, с плотностью до 100 кВт/м^2 и выше
Время истощения	Квазибесконечное	Конечное
Стоимость потребляемой энергии	Бесплатно	Конечное
Стоимость оборудования	Высокая, $\sim 2 \cdot 10^3$ долларов США за кВт установленной мощности	Средняя, $2 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$ долларов США за кВт установленной мощности
Стабильность и управляемость	Стабильность генерируемого потока низкая, наиболее приемлемое управление – управление нагрузкой с прямой связью	Стабильность генерируемого потока высокая, наиболее приемлемое управление – управление расходом с обратной связью
Ограничения для использования	Особенности местных условий и особенности спроса на энергию	Без ограничений
Размеры	Небольшие системы достаточно экономичны, использование больших систем сопряжено с трудностями	Предпочтительнее крупные системы
Научные основы использования источников	Широкий диапазон различных областей науки и техники	Узкий диапазон, прежде всего теплотехника, механика и электротехника
Область применения	Сельское хозяйство, бытовое потребление	Промышленность
Безопасность эксплуатации	Только в период эксплуатации есть опасные зоны	Высокая опасность, требуются специальные средства защиты
Автономность	Самообеспечение источником энергии	Зависят от поставок топлива
Влияние на ОС	Небольшое	Сильное загрязнение
Эстетичность	Достаточная	Лишь для малых установок

отходов и биомассы, энергия приливов и отливов и др. ВИЭ могут обеспечить достаточный уровень жизни, если будут созданы приемлемые по стоимости методы ее преобразования. Для подобного вывода производят следующие выкладки.

При эффективном использовании энергии для обеспечения разумно комфортных условий жизни требуемая среднегодовая мощность на одного человека оценивается 2 кВт. С квадратного метра поверхности планеты все ВИЭ позволяют получать до 500 Вт (Максимальная плотность потока солнечного излучения на Земле достигает 1 кВт/м²). Принимая энергетический КПД преобразования энергии возобновляемых источников в энергию к потребителя не выше 4%, находим, что для 2 кВт мощности требуется 1·10² квадратных метров. С учетом пригородной зоны средняя плотность населения городов оценивается 500 человек на квадратный километр, которым требуется мощность потребления энергии нетто 1·10³ кВт. Для этих целей необходимо 50·10³ квадратных метров, т.е. 5% площади, что вполне приемлемо и очевидна актуальность работ в этом направлении.

Независимо от мощности установок, использующих ВИЭ, анализируя возможность их использования надо дать ответ на следующие вопросы:

- 1) В данной местности чему равны ресурсы потенциальных ВИЭ?
- 2) Какие потребители могут использовать энергию указанных источников?
- 3) Как соотносится стоимость энергии источников традиционных и разрабатываемых на базе ВИЭ?

Экономическое обоснование проекта использования ВИЭ следует делать лишь после выполнения двух условий:

- поняты и использованы принципиальные преимущества конкретных ВИЭ в конкретном месте;
- максимально эффективен весь процесс преобразования ВИЭ благодаря достижению экстремумов потерь, социальных и экономических показателей.

Для ответа на данные вопросы требуется многолетние наблюдения окружающей среды, анализ возобновляемых энергоресурсов, прежде всего, колебания мощности во времени. К сожалению, данные метеостанций не охватывают всего требуемого набора данных и, как правило, не относятся к местности, где может быть построена установка на ВИЭ. Характерные параметры основных ВИЭ представлены в табли-

це 9.2., которые очевидно весьма сильно изменяются в зависимости от вида ВИЭ и данной местности.

Таблица 9.2

Некоторые из основных параметров ВИЭ

Источник	Периодичность	Определяющие параметры	Энергетические соотношения	Примечание
Прямое солнечное излучение	24 часа, 1 год	Облученность (Вт/м^2), угол падения излучения	$N \sim G_b \cdot \cos \theta_z$ Максимум 1 кВт/м^2	Только дневное время суток
Рассеянное солнечное излучение	24 часа, 1 год	Облачность	$N \ll G$, $N \leq 0,3 \text{ кВт/м}^2$	Только дневное время суток
Биотопливо	1 год	Качество почвы, облученность, вода, специфика топлива, расходы	Связанная энергия $\sim 10 \text{ МДж/кг}$	Источники: лесное и сельское хозяйство, коммунальные отходы
Ветер	1 год	Скорость ветра на той или иной высоте над поверхностью	$N \sim w_0^3$ При скорости 10 м/с плотность потока энергии 1 кВт/м^2	Флуктуирует
Волны	1 год	Амплитуда (H_s) и период (T) волны	$N \sim T \cdot H_s^2$ Высокая плотность потока энергии $\sim 50 \text{ кВт/м}^2$	Ряд районов
Гидроэнергия	1 год	Напор (H) и расход (Q) воды	$N \sim P \cdot Q$	Искусственное водохранилище
Приливы	12 часов 25 минут	Высота прилива (R), площадь бассейна (A), длина (L) и глубина (H) эстуария	$N \sim A \cdot R^2$	Ряд районов
Тепловая энергия	Постоянство параметров	Разность температуры воды на поверхности и глубине ΔT	$N \sim \Delta T^2$	Низкая эффективность преобразования

Ни один ВИЭ не является универсальным, требуется в каждом случае дифференцированный, комплексный подход. Очевидно необходимость работ по использо-

ванию ВИЭ, влияние ВИЭ на многие стороны жизни, в том числе и рассредоточение населения, изменение ландшафта, образование, науку, промышленность.

Для условий РБ наибольший интерес представляет использование энергии биомассы. Несмотря на низкий КПД фотосинтеза (0,2% на суше и 0,02% в океане) ежегодный урожай биомассы на Земле весьма велик. Полный энергетический потенциал такого урожая достигает $29 \cdot 10^3$ ГВт на суше и $14 \cdot 10^3$ ГВт в океане, что в 4,5 раза превышает общий объем энергопотребления во всем мире. Все продукты фотосинтеза, как в виде растительной массы, так и в виде органических отходов в принципе могут быть использованы для получения топлива.

Более половины урожая биомассы приходится на долю лесов. Издавна наиболее широко используются дрова, за счет которых в мире в настоящее время получают общий энергопоток, оцениваемый величиной $2 \cdot 10^3$ ГВт. В ряде районов Азии и Африки за счет дров покрывают до $8 \cdot 10^1\%$ потребностей в энергии.

Лес в мире распределен регионально и используется неравномерно. Наряду с хищническим истреблением лесов в одних районах, во многих других он практически не используется.

В РБ, как ранее указывалось, необходимо увеличить использование древесного топлива. Здесь важен дифференцированный подход. Применение этого местного возобновляемого источника энергии в очень сильной степени снижает затраты на отопление и другие нужды. В качестве примера можно привести успешный опыт создания БГПА в содружестве с ОАО "Амкодор" серии теплогенераторов на дровах, разной мощности (от 350 до 800 кВт). КПД теплогенераторов на дровах находится в пределах 85 – 90%. Топка (рис.9.2, размеры на этом рисунке и других даны в метрах) обеспечивает устойчивую работу теплогенератора на дровах самой различной влажности, на отходах лесозаготовок и пр. Перспективно использование топки Шершнева для сжигания опилок и щепы для компоновки ее с существующими огне-техническими устройствами.

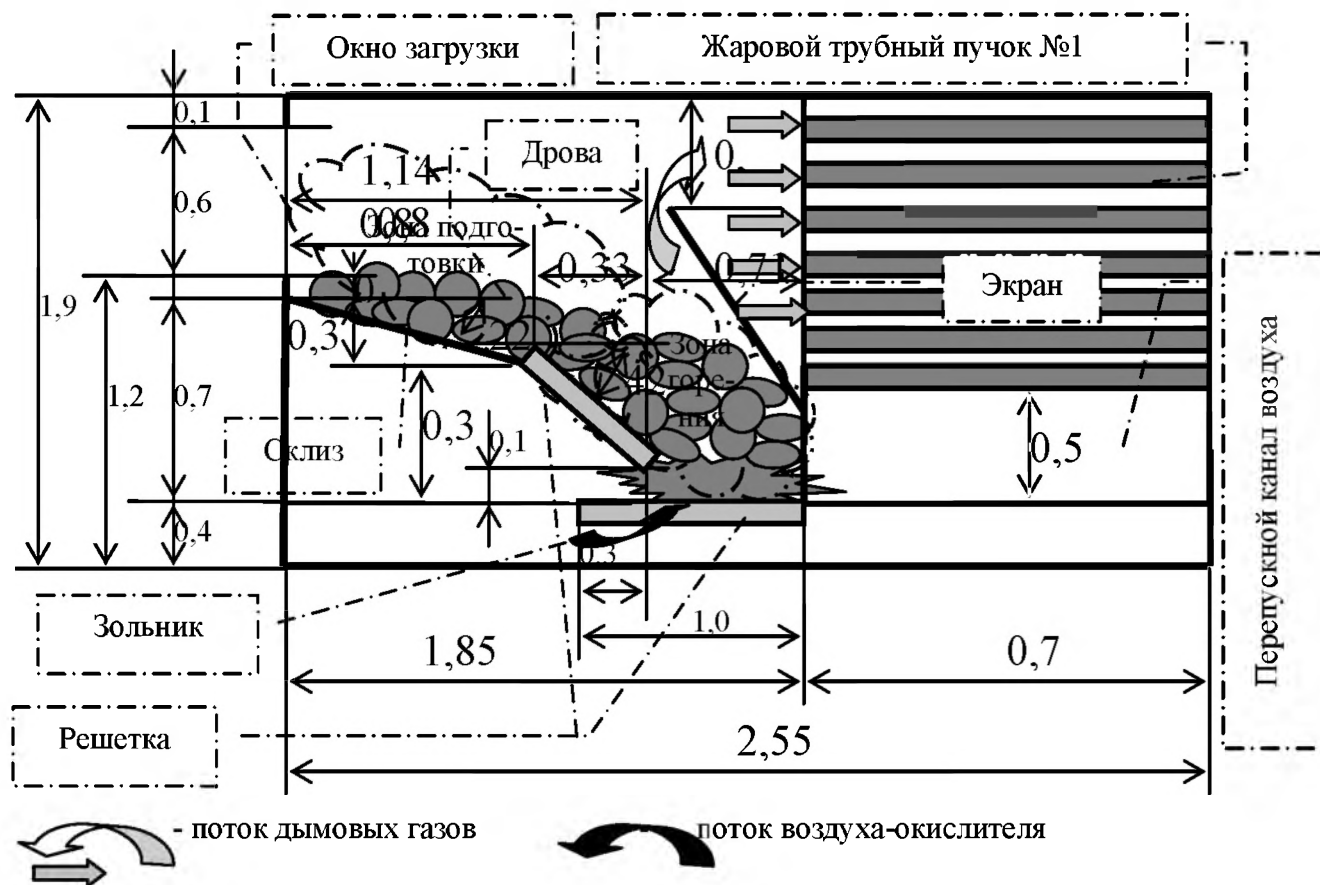


Рис.9.2. Принципиальная схема топки теплогенератора мощностью 500 кВт

Конструкция предусматривает очистку поверхностей нагрева, выполненную в виде жарового и дымогарных трубных пучков (рис.9.3 – 9.4), от сажевых отложений, что обеспечивает высокие показатели в течение всего срока эксплуатации.

При выращивании лесов специально для энергетических целей с каждого гектара можно получить ежегодно по $(4 - 8) \cdot 10^1$ тонн древесины. Сейчас во многих странах мира изучаются возможности и принимаются практические меры по специальному выращиванию быстрорастущих деревьев и высокоурожайных растений для энергетических нужд. Например, канадская ива позволяет собрать за два года с одного гектара, в энергетическом эквиваленте, до 16 тонн условного топлива. Сахалинский бамбук в течение года дает соответственно 8 тонн условного топлива. В РБ в ряде областей закладываются опытные энергетические плантации быстрорастущих деревьев. Весьма широкие масштабы “энергетические” плантации приняли в Бразилии. Здесь выращивается сахарный тростник, сорго и маниока для получения этанола, производство которого достигло $5 \cdot 10^3$ миллиона литров в год. Этанол используется в качестве добавки (20%) к бензину.

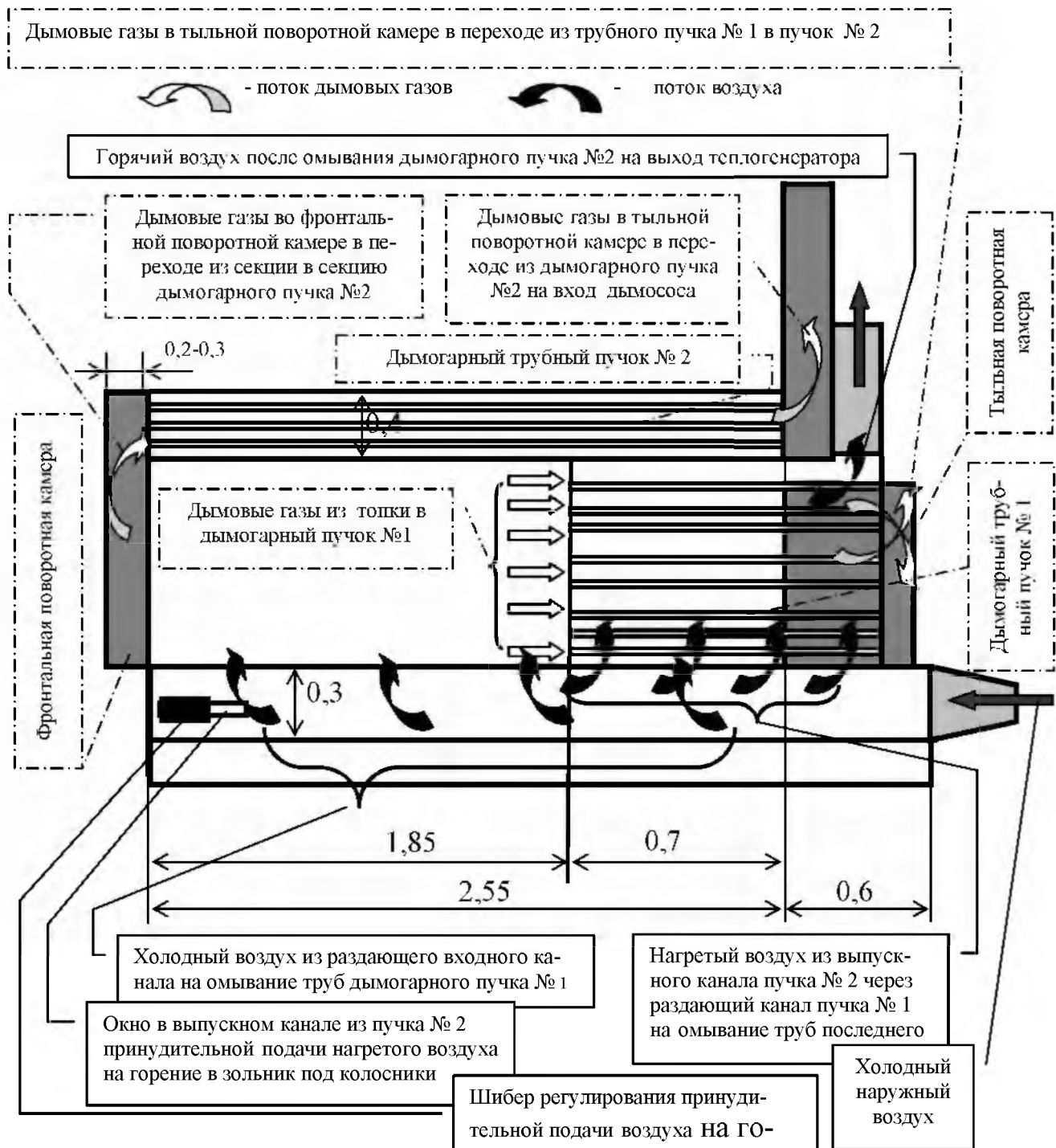


Рис.9.3. Принципиальная схема движения дымовых газов и воздуха в теплогенераторе (вид сбоку)

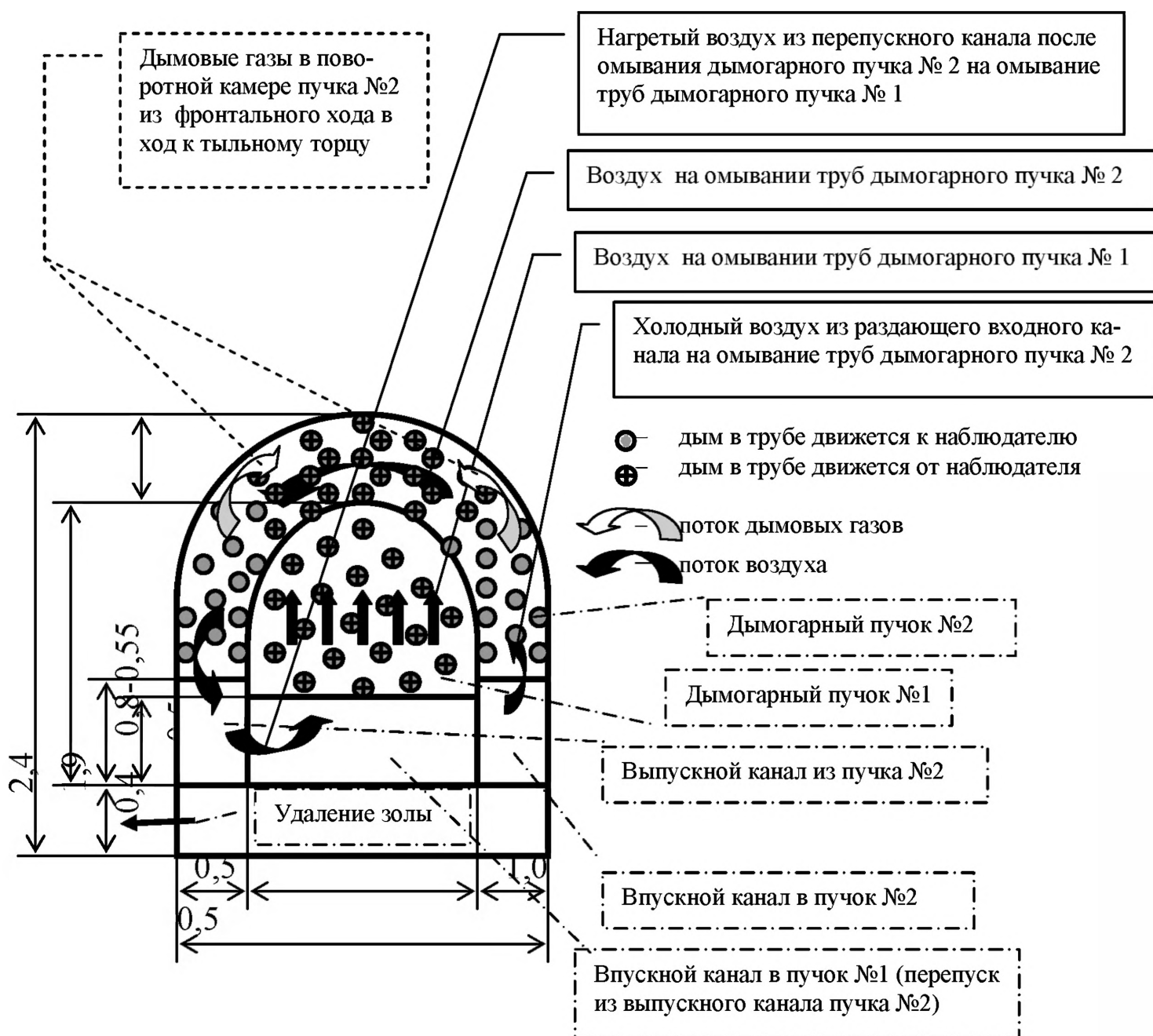


Рис.9.4. Принципиальная схема теплогенератора (вид с фронта)

Весьма перспективно разведение в США, в Средиземноморье и ряде других районов мира эйфорбии, или молочая. Полученное из него моторное топливо может конкурировать по стоимости с выработанным из привозной нефти.

Рассматривается вопрос по выращиванию для энергетических целей водорослей. Средний урожай которых в сутки достигает $3 \cdot 10^1$ грамм на квадратный метр. С одного гектара за сезон можно получить до 36 тонн биомассы. Переработка такого количества биомассы обеспечивает выработку до $10 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ метана.

Разумеется, что специальное создание “энергетических” плантаций и использование естественных лесных угодий не должно разрушать сложившиеся экосистемы и не должно сокращать производство продуктов питания.

В условиях такого рода ограничений представляет интерес энергетическое использование органических отходов. В развитых странах на одного человека в год приходится до 5 тонн сухих органических отходов. Для всех Европейских стран и стран СНГ общий годовой выход отходов оценивается в $2 \cdot 10^9$ тонн. В США общий годовой объем органических отходов достигает $1 \cdot 10^9$ тонн. Городские отходы, в этом объеме, составляют 25%, оставшиеся 75% приходятся на сельскохозяйственный сектор. В том числе, 25% составляют отходы животноводства (навоз). Из указанного количества отходов можно получить метана $1,5 \cdot 10^{11}$ м³ в год.

За счет переработки органических отходов крупных городов можно получить годовое производство горючих газов в следующих объемах: Токио и Нью-Йорк - по $2 \cdot 10^2$ миллионов м³, Лондон и Москва - по $1 \cdot 10^2$ миллионов м³.

В сельском хозяйстве наиболее значительными являются отходы зернопроизводства. Переработка 1,5 млн. тонн сухих стеблей кукурузы, для выращивания которой требуется площадь 30 тыс. гектаров, дает $5 \cdot 10^2$ миллионов м³ газа в год. Стоимость газа 0,07 \$/м³.

Для СНГ массовым отходом полеводства является солома злаковых. Ее количество превышает $2 \cdot 10^2$ миллионов тонн в год. На различные нужды расходуется половина, оставшиеся $1 \cdot 10^2$ миллионов тонн могут дать $2 \cdot 10^1$ миллиарда м³ метана.

Одним из весьма перспективных направлений энергетического использования является производство биогаза. Биогаз – продукт анаэробного брожения различных органических веществ растительного (солома, ботва и пр.) и животного (навоз) происхождения. Влажность исходного сырья может колебаться от 30 до 90 %. Наиболее эффективно производство биогаза из навоза, тонна которого позволяет получить до 24 м³ метана. Из тонны сухого вещества указанного органического сырья образуется до $4,5 \cdot 10^2$ м³ биогаза, состоящим из метана (СН₄) и диоксида углерода (СО₂). Содержание метана в биогазе находится в пределах 50 – 80 %, что обеспечивает теплоту сгорания $Q_{н}^p = 23,0 - 25,1$ МДж/м³. В США годовое количество отходов животноводства по сухому веществу превышает $2,5 \cdot 10^2$ миллионов тонн, что может обеспечить производство более $1 \cdot 10^2$ миллиардов м³ биогаза. Это количество покрывает почти $2 \cdot 10^1\%$ потребности США в природном газе.

Биогазовая установка, использующая навоз при ферме крупного рогатого скота на 100 голов, способна выдать около $140 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ биогаза, при свиноферме на $1,0 \cdot 10^3$ голов – $120 \cdot 10^3 \text{ м}^3$, при птицефабрике на $22 \cdot 10^3$ кур – $280 \cdot 10^3 \text{ м}^3$. Один из откормочных пунктов в США, рассчитанный на $30 \cdot 10^3$ голов крупного рогатого скота, дает в год 30 миллионов м^3 биогаза. В СНГ ежегодно получается более $1 \cdot 10^2$ миллионов тонн отходов животноводства. Переработка такого количества отходов может дать $3 \cdot 10^1$ миллиардов м^3 метана или $4 \cdot 10^1$ миллионов тонн условного топлива.

Очевидно, что биогаз представляет собой хорошее и, подобно природному газу, технологичное топливо, которое можно использовать в различных установках, в том числе и в генерирующих теплоту и электроэнергию. Биогаз в ряде случаев практически на нет сводит потребление внешних энергоресурсов объектами агропромышленного комплекса. При этом навоз остается ценным удобрением, столь необходимым в сельскохозяйственном цикле. Перспектива применения биогаза велика, ему уделяют большое внимание в Японии, в странах Европейского экономического сообщества: Италии, Франции, Великобритании, Дании, ФРГ, Нидерландах. В США фирма “Биогаз Колорадо” промышленно производит технологические линии по производству биогаза. В Китае, по данным ЮНЕСКО, около 7 млн. установок уже удовлетворяют 30% потребности населения в топливе. В Индии действует свыше $30 \cdot 10^3$ биогазовых установок, обеспечивающих топливом более $200 \cdot 10^3$ человек. При этом от каждой тонны сухого навоза получают биогаза в пересчете на условное топливо 0,75 тонны.

Генераторы теплоты и электроэнергии на возобновляемых источниках энергии, прежде всего энергии солнечного излучения и ветра, по прогнозам должны значительно сократить расходы ископаемого топлива. Например, на территории СНГ годовые ветроэнергетические ресурсы оцениваются в $3 \cdot 10^{16}$ кДж. Поток энергии Солнца на поверхность Земли огромен, но плотность его на границе с атмосферой Земли сравнительно невелика и составляет $1,36 \text{ кВт/м}^2$. Распределение указанных энергоресурсов по регионам крайне неравномерна, поэтому большое влияние на эффективность использования ВИЭ оказывает географическое местоположение и климатические особенности местности.

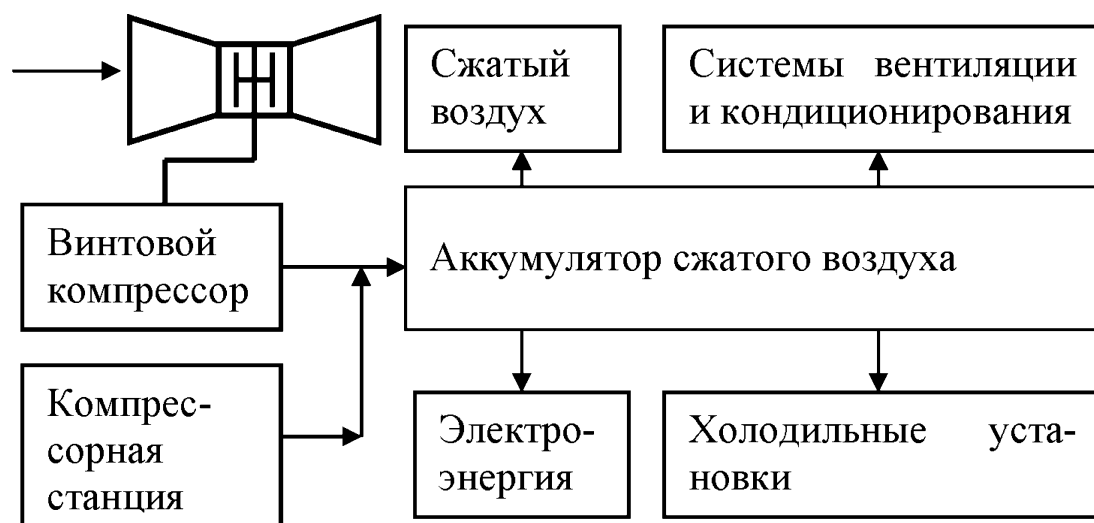


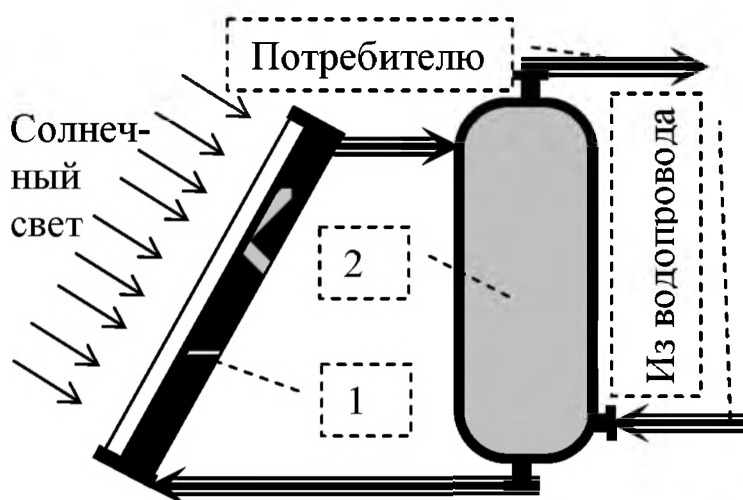
Рис.9.5. Использование сжатого воздуха, полученного с помощью энергии ветра

Республика Беларусь находится в зоне, где использование указанных ВИЭ имеет пониженную эффективность. Наибольшие среднемесячные скорости ветра в РБ в зимний период 4 – 5 м/с, в летний 2 – 3

м/с, в то время как имеющиеся ветродвигатели имеют нижний предел скорости ветра, позволяющей их эксплуатацию около 3,5 м/с. Наиболее эффективны ветроустановки в районах со средними скоростями более 5 м/с. Ведутся разработки ветроагрегатов для работы на меньших скоростях ветра. На современном этапе главное направление в использовании энергии ветра – выработка электроэнергии, при этом, 70% стоимости установки составляет устройство адаптации вырабатываемой электроэнергии к требованиям сети или индивидуального потребителя. Весьма перспективно, в этой связи, использовать энергию ветра для получения сжатых сред, например, сжатого воздуха, в котором нуждаются многие предприятия. В этом случае решаются многие проблемы, связанные с использованием энергии ветра, например, проблема неравномерности выработки энергоресурса и его аккумуляции. Как известно, производство сжатого воздуха является энергоемкой операцией: современным компрессорам при КПД $\approx 0,8$ на получение кубического метра давлением 0,8 МПа необходимо около $3 \cdot 10^2$ кДж энергии, или на $1 \cdot 10^3$ м³ расходуется не менее $1 \cdot 10^2$ кВт·ч. В Российской Федерации разработана модульная установка, размещаемая на крыше производственного здания, для получения сжатого воздуха с помощью винтового компрессора, использующего энергию ветра. Диаметр платформы составляет 12 метров, диаметр ротора ветроколеса Дарье равен 3,5 метра. Расположено оно в вертикальном канале, что снимает ряд проблем, связанных с эксплуатацией ветроколеса. На крыше здания длиной 200 метров располагается 8 модулей

суммарной производительностью эквивалентной компрессорной из четырех компрессоров К-250. Мощность привода последней составляет 7 МВт. В зависимости от режима потребления компрессорная станция может быть основной, а ветроустановка – резервной и наоборот. Для аккумуляции сжатого воздуха используются различные системы, например, стандартные магистральные газовые трубы большого диаметра (~1,4 м), которые одновременно служат строительными конструкциями. Использовать полученный таким образом воздух можно в различных целях, рис.9.5.

Технически наиболее доступный путь использования солнечной энергии в РБ – солнечное теплоснабжение (прежде всего горячее водоснабжение) специфических объектов. Основным элементом системы солнечного теплоснабжения – солнечный коллектор, представляющий собой водонагреватель в виде штампованных стальных, алюминиевых, пластмассовых или резиновых изделий. Их производство налажено в РБ. Производительность одного квадратного метра коллектора достигает $1 \cdot 10^2$ литров воды в день с температурой 70°C . Сегодня в условиях Беларуси использование солнечных коллекторов для нужд горячего водоснабжения на АБЗ вполне оправданно и удобно, не представляет никаких технических трудностей, окупается в сроки, которые отвечают современным требованиям. Простейшая схема термосифонного одноконтурного солнечного горячего водоснабжения изображена на рис. 9.6. Солнечный коллектор 1 соединен трубопроводами с баком-аккумулятором 2. Эти элементы создают контур естественной циркуляции. В нем холодная вода, поступившая в донную часть бака – аккумулятора из водопровода, подается в солнечный коллектор, там нагревается и движется дальше в верхнюю часть бака - аккумулятора. От-



туда горячая вода забирается потребителем. Подобная схема обеспечивает разделение горячей и холодной воды (стратификацию) в баке-аккумуляторе. Система работает круглогодично при положительных температурах или сезонно, если наступают морозы. Солнечный коллек-

Рис.9.6. Принципиальная схема солнечного горячего водоснабжения

тор устанавливается наклонно. Угол наклона равен географической широте местности плюс 10-15°.

Схема одного из вариантов непосредственно солнечного коллектора приведена на рис.9.7. Плоский солнечный коллектор состоит из пластины 1, воспринимающей

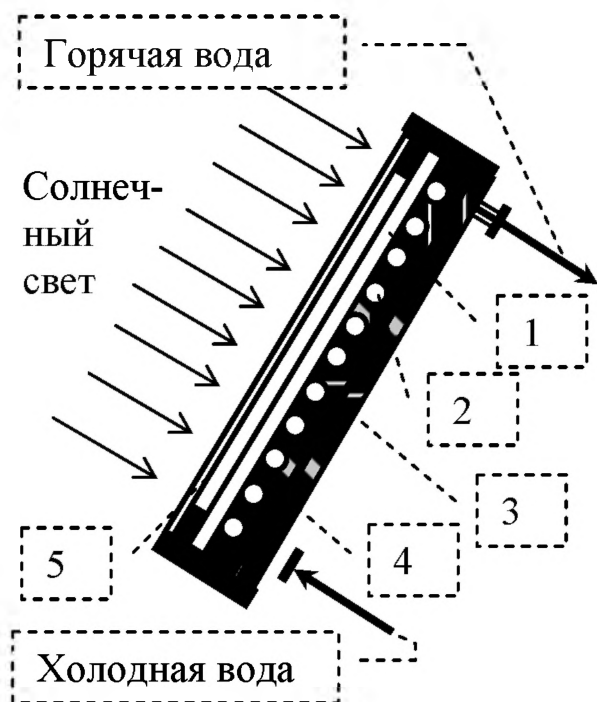


Рис.9.7. Принципиальная схема плоского солнечного коллектора

солнечное излучение, с приваренными трубками 2, кожуха 3, тепловой изоляции 4 и прозрачной защитной пластины 5. Солнечное излучение, падающее на прозрачную защитную пластину 5, частично проходит сквозь нее, а частично отражается. Прошедшая доля излучения поглощается теплопринимающей пластиной 1, превращаясь в ее внутреннюю энергию, и передается протекающему по трубкам теплоносителю. Нагретый теплоноситель подается к потребителю. Пластина 1 также частично отражает падающее на нее излучение

на внутреннюю поверхность защитной пластины 5. От нее поток радиации вновь отражается внутрь или проходит насквозь и попадает в атмосферу. Современные коллекторы оснащаются теплоприемной пластиной, изготовленной по типу «труба в листе» из алюминия, нержавеющей стали или из пластмассы.

Отметим, что КПД коллектора зависит от факторов различного происхождения: метеорологических, режимных, конструктивных. Установлено, что КПД коллектора возрастает с увеличением произведения коэффициента теплопроводности материала на толщину пластины, т.е. в последовательности: пластмасса, нержавеющая сталь, алюминий, медь. Существует целый ряд мер, предпринимаемых для повышения КПД коллектора. Прежде всего, это вакуумирование внутреннего пространства между прозрачной защитой и теплопринимающей пластиной. Создание вакуума значительно сокращает конвективные потери, но такая операция повышает стоимость коллектора. Тепловые потери с боковых поверхностей и дна уменьшаются при использовании эффективной тепловой изоляции, в качестве которой применяют

минеральную вату, фольгированную алюминием, пенополистирол и другие материалы. Снижение потерь за счет излучения с фронтальной поверхности достигают путем устройства двух - и даже трехслойного остекления. Нанесение селективного покрытия на поглощающую пластину также позволяет уменьшить потери излучения в инфракрасной части солнечного спектра. Эти покрытия обладают высокой поглощательной способностью в спектре солнечного излучения и, одновременно, характеризуются низкой поглощательной способностью, а следовательно, и низкой степенью черноты в области длинноволнового инфракрасного излучения, доля которого возрастает при увеличении температуры поглощающей пластины. К материалам, обладающим селективными свойствами относятся «черный никель», «черный хром», оксид натрия и др. Селективные свойства этих материалов характеризуются большой величиной отношения a/ε (a - поглощательная способность покрытия, ε - степень черноты поглощающей поверхности).

Селективное покрытие можно наносить на внутреннюю поверхность прозрачной защиты. В этом случае покрытие также должно быть прозрачным, например, из полупроводникового материала. С учетом всех усовершенствований КПД современных коллекторов доведен до 45-60%.

Трудности использования ВИЭ достаточно многочисленны. Это, прежде всего, необходимость резервирования источников питания для потребителей соответствующих категорий по надежности электроснабжения из-за неравномерности выработки энергии установками, использующими солнечное излучение и энергию ветра. Но основные трудности использования ВИЭ имеют место из-за низкой плотности потока ($\sim 1 \text{ кВт/м}^2$) энергии солнца и ветра (в паровых котлах $\sim 100 \text{ кВт/м}^2$), что приводит к резкому увеличению размеров оборудования, а следовательно, к большим затратам энергии на выработку необходимых конструкционных материалов (прошлые затраты). Вся бестопливная энергетика, все ВИЭ, если они включаются в энергетический комплекс, должны удовлетворять естественному условию: давать экономию топлива большую, чем затраты топлива на создание установки на базе ВИЭ. Иначе создание такой установки бессмысленно. Естественно, что небольшие энергоустановки в тех районах, где нет соответствующей инфраструктуры, этому условию удовлетворять не должны, что объясняет наибольшее распространение в

настоящее время ветроустановок мощностью до 5 кВт. Это механизация работ на удаленных объектах (водоподъем, мелиорация, орошение, катодная защита трубопроводов, освещение и отопление) в местах удаленных от электросетей энергосистемы, куда доставка топлива обходится дорого.

Интересна установка водоподъема, например, в водонапорную башню без затрат энергии традиционных источников. Она успешно заменяет традиционные насосы с механическим (электрическим) приводом для подачи воды из равнинных водоемов или водопроводов. Для оценки ее возможностей достаточны такие цифры: поток воды с напором 2 м позволяет 10% его расхода поднять на высоту 12 м, КПД составляет величину около 60%. На рис.9.8 приведена принципиальная схема такой установки, получившей название "гидравлический таран". Вода (с расходом M , кг/с) из источника по питающему водоводу опускается на высоту H метров. В результате потенциальная энергия воды (MgH) преобразуется в кинетическую энергию потока, которая далее снова превращается в потенциальную энергию (mgh) в ходе подъема части воды (с расходом m , кг/с) на высоту h метров. Протекает процесс следующим образом:

- при открытом отбойном и закрытом напорном клапанах вода по питающему водоводу вытекает наружу, имея кинетическую энергию в соответствии с законами сохранения; гидродинамические силы потока воды увлекают за собой отбойный клапан, который в конечном итоге перекрывает свободный сток воды;
- за счет динамического напора поток открывает напорный клапан и поступает внутрь напорного колпака, находящегося под избыточным давлением столба воды h . За счет динамического напора часть воды по нагнетательному трубопроводу поступает в приемную емкость, часть поступает непосредственно в напорный колпак, сжимая находящийся в его верхнем объеме воздух;
- в определенный момент, когда кинетическая энергия потока в водоводе расходуется на увеличение потенциальной энергии воды в приемной емкости за счет поданной свежей порции воды и увеличение внутренней энергии воздуха в напорном колпаке. Скорость потока падает до нуля и напорный клапан под действием сил собственного веса закрывается. Сжатый воздух расширяется до начального

избыточного давления (определяемого высотой столба воды h), выдавливая дополнительную порцию воды в приемную емкость;

- В отсутствие иных сил, когда поток в питающем водоводе неподвижен, отбойный клапан за счет сил тяжести опускается, открывая сток воды наружу. Поток воды в подающем водоводе набирает скорость, и процесс повторяется сначала с частотой, определяемой характеристиками системы и близкой к одному герцу.

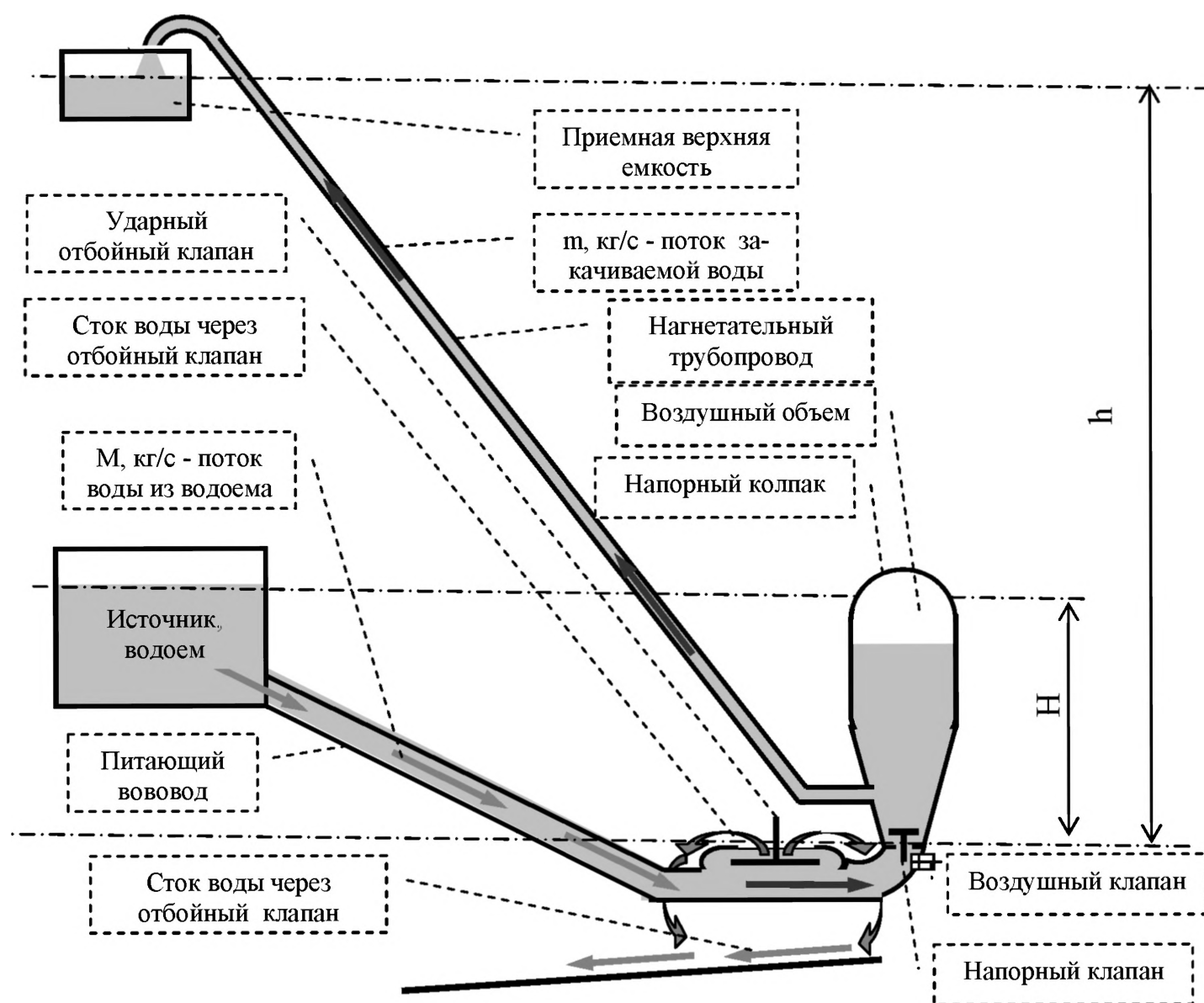


Рис.9.8. Принципиальная схема установки для подъема воды

Заключение

Для современной цивилизации эффективное и грамотное использование энергоресурсов имеет решающее значение для обеспечения производства и жизнедеятельности людей. Рациональное потребление всех видов энергоресурсов, а особенно органического топлива, которое также является ценнейшим сырьем для химической промышленности, представляет собой одну из важнейших научно-технических проблем. Ее эффективное решение возможно лишь при системном подходе и объединении усилий специалистов разного профиля: энергетиков, технологов, техников, строителей и т.д.

Важное значение имеет также понятие энергетической культуры всего населения, воспитание с детских лет бережного отношения к тепловой и электрической энергии, топливу, воде и т.д. Планируя и осуществляя производственную деятельность на современном этапе, необходимо помнить о ее экологических последствиях и энергетических нуждах будущих поколений человечества, которые могут оказаться в весьма затруднительном положении уже в обозримой перспективе из-за недуманного, нецивилизованного отношения к энергоресурсам своих предшественников. В этом состоит морально-этический аспект энергоиспользования и ресурсосбережения.

Разработка методов и средств рационального применения и экономии энергоресурсов в системах энергообеспечения и энерготехнологических установках промышленных предприятий связана с решением достаточно большого комплекса задач, направленных на оптимизацию режимов и структуры энергопотребления, а также на снижение энергоемкости единицы продукции.

К наиболее эффективным энергосберегающим мероприятиям относятся:

- Переход на энергоэффективные технологические процессы, сокращение материалоемкости выпускаемой продукции, повышение уровня организации производства;
- Совершенствование структуры энергетического оборудования, вывод из эксплуатации устаревшего и неэффективного оборудования;
- Разработка и внедрение энергоэффективных электроприемников, электрооборудования и электроприводов, совершенствование управления их режимами;

- Снижение потерь энергоресурсов и повышение уровня использования вторичных энергоресурсов;
- Применение комбинированных энерготехнологических процессов;
- Реструктуризация промышленных предприятий и промышленности в целом, имеющая целью исключение из производственного процесса неэффективных и малозагруженных технологических установок;
- Совершенствование энергетического управления предприятием.

Энергосберегающие мероприятия, как правило, требуют капиталовложений. В связи с этим в первую очередь на предприятиях следует применять беззатратные и относительно малозатратные энергосберегающие мероприятия, не связанные со значительными капиталовложениями.

В заключение отметим, что проблема энергосбережения в народном хозяйстве исключительно многопланова и предполагает непрерывную эволюцию решений комплекса взаимосвязанных задач с учетом последних достижений фундаментальных и прикладных наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гофман И. В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий.— М.– Л., Энергия, 1996.—320 с.
2. Радкевич В. Н. Проектирование систем электроснабжения.—Мн.: НПООО «Пион», 2001. —292 с.
3. Кудрин Б. И., Прокопчик В. В. Электроснабжение промышленных предприятий.—Мн.: Высшая школа, 1988.—357 с.
4. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий.—М.: Энергоатомиздат, 1984. — 472 с.
5. Немцов З. Ф., Арсеньев Г. В. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение.— М.: Энергоиздат, 1982.
6. Сазанов Б. В., Ситас В. И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий.—М.: Энергоатомиздат, 1990.—304 с.
7. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения.—М.: Энергоатомиздат, 1998.— 288 с.
8. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа.—М.: Энергия, 1973. — 296 с.
9. Гельперин Н. И. Тепловой насос. Л.: Госнаучтехиздат, 1931.—152 с.
10. Шински Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии. Пер. с английского под ред. канд. техн. н. Е. К. Масловского.—М.: Мир, 1987.—378 с.
11. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий.—М.: Энергоатомиздат, 1987.—336 с.
12. Экспресс-методика разработки мероприятий по энергосбережению на основе составления энергобаланса промышленного предприятия.—Мн.: ТЭО «Беларусэнерго», 1991.— 105 с.
13. Анчарова Т. В., Гамазин С. И., Шевченко В. В. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях.—М.: Высшая школа, 1990.—143 с.
14. Понаровкин Д. Б., Лоскутов А. В., Матюнина Ю. В. Основы энергетического менеджмента.—М.: Издательство МЭИ, 2000.—72 с.

15. Методические указания по определению эксплуатационных показателей тепловых пунктов в закрытых системах теплоснабжения.—М.: ОНТИ АКХ, 1977.
16. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 176 с.
17. Ястребов П. П., Смирнов И. П. Электрооборудование и электротехнология. — М.: Высшая школа, 1987.— 199 с.
18. Вагин Г. Я. Режимы электросварочных машин.—М.: Энергоатомиздат, 1985.— 192 с.
19. Кацман М. М. Электрические машины.—М.: Высшая школа, 1990.—463 с.
20. Кнорринг Г. М., Фадин И. М., Сидоров В. Н. Справочная книга для проектирования электрического освещения.—С.-Пб.: Энергоатомиздат, 1992.—448 с.
21. Азалиев В. В., Варсанюфьева Г. Д., Кроль Ц. Е. Эксплуатация осветительных установок промышленных предприятий.—М.: Энергоатомиздат, 1984.—160 с.
22. Поспелова Т. Г. Основы энергосбережения.— Мн.: УП "Технопринт", 2000. — 353 с.
23. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии.—М.: Мир, 1987.— 271 с.
24. Кузнецов Б. В. Расчеты экономии электроэнергии.—Мн.: Беларусь, 1983.—80 с.

Учебное издание

**Романюк Владимир Никанорович
Радкевич Владимир Николаевич
Ковалев Ярослав Никитич**

**ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОГО ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
ДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ**

Для слушателей факультета повышения квалификации
инженерно-технического персонала дорожной отрасли

Ответственный за выпуск А.П. Аношко

Подписано в печать 27.06.2001 г. Формат 60x84/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 33,95. Уч.-изд. л. 20,18.
Тираж 500. Заказ 862.

Издательство УП "Техопринт" ЛВ № 380 от 29.04.99
Отпечатано на УП "Техопринт" ЛП № 203 от 26.01.98
220027, Минск, пр-т Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф.215, тел. 231-86-93,
E-mail: technoprint@tut.by



РОМАНЮК ВЛАДИМИР НИКАНОРОВИЧ

1946 года рождения.

Чл.- корр. Белорусской инженерной академии.

Канд. техн. наук, доцент кафедры

"Промышленная теплоэнергетика и теплотехника"

Белорусской государственной политехнической академии.

Автор около 100 научных работ.

Подготовил двух канд. техн. наук.



РАДКЕВИЧ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

1943 года рождения.

Канд. техн. наук,

доцент кафедры "Электроснабжение"

Белорусской государственной

политехнической академии.

автор около 100 научных трудов.



КОВАЛЕВ ЯРОСЛАВ НИКИТИЧ

1933 года рождения.

Академик Международной инженерной академии.

Академик Белорусской инженерной академии.

Доктор техн. наук, профессор кафедры

"Строительство и эксплуатация дорог"

Белорусской государственной политехнической академии.

Автор более 250 научных работ и 50 изобретений.

Подготовил двух докторов техн. наук и семь канд. техн. наук.

ISBN 985-464-118-X



9 789854 641188