

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЭС НА СИБИРСКИХ УГЛЯХ

В.В. Саломатов

Тепловые электрические станции (ТЭС), особенно работающие на угле, оказывают самое существенное негативное воздействие на окружающую среду, недопустимое во многих случаях уже сегодня. В этой связи перспективные энергетические технологии и оборудование должны разрабатываться так, чтобы их влияние на среду обитания соответствовало самым жёстким санитарным нормам. Выполнение этих требований экономически оправданными средствами встречает серьёзные трудности. Для их преодоления требуется сбалансированная концепция создания экологически чистой ТЭС (ЭЧТЭС).

В соответствии с мировым и отечественным опытом разработок технических предложений по созданию ЭЧТЭС требуется решить следующие основные проблемы: создание экологообеспечивающей и энергоэффективной технологии сжигания низкосортных углей, применение различных перспективных способов нейтрализации и утилизации отходов угольных энергоблоков.

Представлены концептуальные основы двух ЭЧТЭС на канско-ачинских углях: с применением вихревой технологии сжигания и с технологией газификации в барботируемом шлаковом расплаве. Также рассмотрены две концепции ЭЧТЭС на кузнецких углях: с использованием технологии циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) и на базе парогазовой технологии (ПГУ) с внутрицикловой газификацией под давлением. Общим признаком разрабатываемых ЭЧТЭС является создание на базе ТЭС многоотраслевого энерготехнологического комплекса – энергоагропромкомплеса (ЭАПК). ЭАПК – это серия сопряжённых с теплоэлектростанцией дорстройкомбинатов, перерабатывающих заводов, агропредприятий и т.д., эффективно использующих отходы основного производства и производящих сырьё для стройиндустрии, металлургии, химии, сельского хозяйства и другую продукцию с потребительскими свойствами. ЭАПК – практически замкнутое, безотходное производство с наивысшими энергоэкологическими показателями.

ЭЧТЭС – магистральное направление развития отечественной и мировой энергетики.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетика является основой развития большинства отраслей промышленности и, в конечном итоге, определяет технический уровень всего народного хозяйства страны. В начале столетия производство и потребление энергии в мире удваивалось за 50 лет, в настоящее время – за 10-15 лет. При этом непрерывно увеличивается техногенное воздействие энергетики на окружающую среду. Так, во многих странах ежегодные выбросы энергетических установок являются основными источниками загрязнения окружающей среды и составляют в сумме $25 \cdot 10^9$ тонн летучей золы, $1,5 \cdot 10^8$ тонн оксидов серы, $1,2 \cdot 10^9$ тонн оксидов азота.

Сооружение новых и реконструкция действующих тепловых электростанций на углях требует выбора наиболее эффективных конструкций котлоагрегатов и систем очистки и нейтрализации продуктов сгорания применительно к каждому виду топлива. При этом следует решить целый ряд научно – технических и технологических, часто взаимосвязанных проблем. Таких как: массогабаритные характеристики агрегата (определяемые, в первую очередь, эффективностью процесса сжигания и теплонапряжённостью объема камеры сгорания); универсальностью агрегата по топливу (хотя бы в пределах данного вида топлива при достаточном диапазоне колебаний его рабочих характеристик (влажность, зольность и т.д.)); экономические параметры агрегата; системы и методы улавливания и утилизации отходов.

Создание экологически чистой ТЭС, удовлетворяющей всему комплексу технологических и эксплуатационных требований, позволит решить вопрос широкого вовлечения низкокачественных углей в топливный баланс страны. При этом необходимо достигнуть существенного снижения вредных выбросов – золы в 4-5 раз, оксидов серы и азота в 3-4 раза при соответствующем повышении эффективности энергетического оборудования (на 5-8%), уменьшении на 20-30% его металлоемкости и разработке технологий широкого использования в народном хозяйстве отходов: золы – для производства строительных материалов; оксидов серы и азота – для

производства удобрений и химического сырья и т.д. Удорожание электростанций за счёт создания природоохранных систем и дополнительных затрат энергии должно быть в значительной мере компенсировано повышением экономичности и снижением металлоёмкости основного энергетического оборудования, а также использованием в народном хозяйстве отходов.

В соответствии с мировым и отечественным опытом разработок технических предложений по созданию экологически чистых ТЭС намечаются следующие основные направления: разработка и создание котлоагрегатов с технологиями сжигания, позволяющими вести процесс с минимумом вредных выбросов; использование различных способов нейтрализации и очистки вредных выбросов, как в процессе сжигания, так и после котлоагрегата.

Очевидно, что наибольшие трудности вызывает нейтрализация окислов азота и серы, прежде всего, потому, что нет ясных путей, приводящих к положительному результату с экономически приемлемыми затратами. Именно поэтому в основе общей концепции создания экологически чистой тепловой электростанции должен лежать эффективный метод очистки от окислов азота и серы. На данный момент все усилия в этом направлении сосредоточены на снижении температур в топочной камере, что приводит к уменьшению скорости образования токсичных окислов. При этом рассматриваются самые разные конструктивные решения. Это и топки с кипящим (стационарным и циркулирующим) слоем, и снижение температур в топочных камерах за счет более полного использования ее объема, и организация процессов сжигания твердого топлива с переменным коэффициентом избытка воздуха по высоте топочной камеры, и впрыск воды в топочную камеру в зону повышенных температур и т.д. И везде одна цель – снизить среднemasсовую температуру в топочном пространстве.

Однако предлагаемые решения вступают в противоречие или с экономикой (при снижении температур в топке уменьшается ее теплонапряженность, и, соответственно, существенно ухудшаются экономические параметры энергетических блоков), или с экологией (как это имеет место в топках со стационарным кипящим слоем, когда из-за значительного механического недожога в окружающую среду выбрасывается мелкодисперсная пыль, уловить и использовать которую крайне сложно).

В результате современное направление работ по созданию экологически чистой ТЭС чаще всего заключается в отыскании оптимума между экономическими и экологическими параметрами, присущими определенной конструкции: или путем внесения в нее изменений, или путем совершенствования организации процесса сжигания.

Основная цель развиваемого концептуального подхода – разработка схемных решений на базе комплексных требований к экологическим и экономическим проблемам ТЭС с перспективными технологиями сжигания и очистки дымовых газов, утилизации отходов и замкнутыми циклами стоков, с созданием в конечном итоге на базе ТЭС энергоагропромпкомлекса.

Ниже в разделе 2 наиболее подробно рассматривается концепция экологически чистой электростанции на углях канско-ачинского бассейна с технологией вихревого сжигания. В разделе 3 излагается более детально концепция ЭЧТЭС на кузнецких углях с технологией сжигания в циркулирующем потоке.

Все стоимостные расчёты ниже приведены в ценах 1990 г.

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЭС НА КАНСКО-АЧИНСКИХ УГЛЯХ

Основные характеристики Канско-Ачинских углей

Канско-Ачинский бассейн (КАБ) – крупнейшая топливно-сырьевая база на востоке России. Запасы КАБ составляют порядка 140 млрд. т.

Угли КАБ – преимущественно бурые, имеют специфические особенности по сравнению с другими месторождениями. Рабочая влажность колеблется от 24 до 44 %. На воздухе угли быстро теряют влагу, самопроизвольно растрескиваются и превращаются в мелочь. Большая влажность обуславливает также смерзаемость углей при пониженных температурах, что негативно сказывается при их разгрузке и хранении на угольных складах ТЭС.

Угли КАБ относятся к малозольным. Их зольность на рабочую массу A^P колеблется в пределах 7...12 %.

Они обладают большим выходом летучих на уровне 44...48 % и относительно высокими для бурых углей значениями теплот сгорания:

$$Q_0^G = 27...30 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \text{ и } Q_P^H = 11,8...19,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Эти повышенные показатели, с одной стороны, обеспечивают лёгкое воспламенение и выгорание КАУ в топках парогенераторов ТЭС без жёстких требований по измельчению (коэффициент размолоспособности лежит в пределах $K_{\text{ЛО}} = 1,2 \dots 1,4$), с другой – высокая реакционная способность служит причиной самовозгорания и взрыва угольной пыли. Последнее негативно сказывается на надёжности пылесистем.

Отличительным признаком КАУ является наличие в золе большого содержания оксида кальция CaO , достигающего до 60 % при минимальной зольности. С увеличением зольности содержание CaO уменьшается, но сильно повышается уровень оксида кремния SiO_2 .

При сжигании КАУ в режиме жидкого шлакоудаления важную роль играет показатель плавкости золы. Их относят как к легкоплавким, так и к тугоплавким в зависимости от зольности угля. Особенности минеральной части КАУ определили и их высокую шлаковую способность.

Сжигание этих углей приводит к появлению на конвективных и радиационно-конвективных поверхностях нагрева прочных первичных отложений на основе сульфата кальция, а температура начала шлакования оказывается минимальной из всех освоенных топлив и равной $\sim 950^\circ\text{C}$.

Угли КАБ содержат малую долю азота N^{P} (до 0,6 %) и серы S^{P} (до 1 %), что позитивно сказывается на уровне выбросов топливных окислов азота и серы.

Все отмеченные особенности КАУ играют исключительную роль при обеспечении надёжности, экологичности, экономичности и других показателей котельных агрегатов и ТЭС в целом.

Концепция экологически чистой ТЭС с вихревой технологией сжатия КАУ

В развиваемую концепцию закладываются ряд новых разработок и технологий, прошедших опытно-промышленную проверку на пилотных установках и полномасштабных объектах энергетики и защищенных авторскими свидетельствами и патентами.

Предлагаемая концепция создания ЭЧ-ТЭС даёт принципиально новое сочетание технико-экономических и экологических решений, а именно:

1. Котлоагрегат создаётся с минимальными капитальными затратами и металлоёмкостью, максимально теплонапряжённым с

уменьшенными конвективными поверхностями нагрева, так как теплота дымовых газов используется вне котлоагрегата. Температура в топочном объёме при этом поддерживается предельно высокой. Хотя по этой причине и генерируется максимальное количество окислов, последнее не является в данной концепции лимитирующим фактором. Таким образом, конструкция и компоновка котла выбираются такими, чтобы обеспечить достижение максимального экономического эффекта, как в капитальных вложениях, так и в эксплуатационных затратах.

2. Для нейтрализации окислов азота и серы, содержащихся в дымовых газах, применяется система радиационной обработки с помощью электронно-лучевых установок конструкции Института ядерной физики СО РАН. Обработанные электронным пучком окислы азота и серы резко увеличивают свою реакционную способность и превращаются в полезный продукт: или готовое минеральное удобрение (смесь сульфата и нитрата аммония при подаче в реакционный объём аммиака), или важнейшую составляющую при производстве минеральных удобрений (смесь азотной и серной кислот при безаммиачном производстве). Очевидно, что максимальная концентрация окислов – это максимальный выход ценного полезного продукта. Продукт с потребительскими свойствами в виде смеси твёрдых частиц сульфата и нитрата аммония улавливается в электрофильтрах и рукавных фильтрах. В безаммиачном варианте, где полезным продуктом при радиационной нейтрализации является смесь кислот.

3. Очистка промышленных стоков энергоблока осуществляется в испарителях за счёт теплоты дымовых газов, которые охлаждаются в контактных теплообменниках скрубберного типа до температуры $90 \div 95^\circ\text{C}$. Для орошения в контактном теплообменнике используется вода промышленных стоков как условно чистых, так и нефтесодержащих, прошедших очистку от нефти. Эти воды при контакте с дымовыми газами нагреваются до $55 \div 60^\circ\text{C}$, затем поступают в установку термического обессоливания (многоступенчатый испаритель мгновенного вскипания), где под вакуумом испаряются и охлаждаются. Образовавшийся при этом пар конденсируется на трубах конденсатора, затем жидкость подаётся на конденсатоочистку и в контур питательной воды энергоблока.

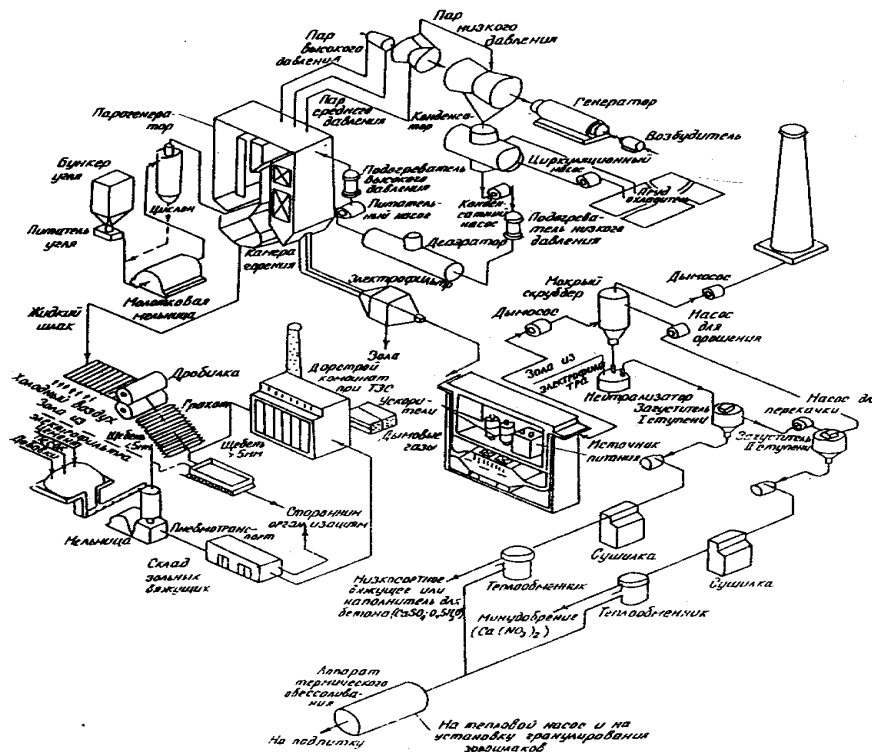


Рис. 2.1. Технологическая схема энергоблока ТЭС с вихревой топкой и лучевой очисткой дымовых газов «мокрым» способом

Продувочная вода (рассол) из последней ступени испарителя направляется в установку грануляции золошлаковых отходов. Таким образом, осуществляется полная нейтрализация промышленных стоков, и одновременно решается задача обеспечения подпиточной водой парогенератора без использования традиционной химводоочистки.

4. Система золошлакоочистки сухая. Мелкодисперсная зола из дымовых газов улавливается в двух последовательно расположенных «горячих» электрофильтрах. Очистка дымовых газов после блока радиационной обработки от смеси сульфата и нитрата аммония и незначительных остатков золы осуществляется в последовательно расположенных рукавных фильтрах.

5. Способ поджига пылеугольного факела и поддержания горения на пониженных нагрузках – плазменное воспламенение и подсветка пылеугольной аэросмеси с использованием плазмогенераторов конструкции ИТ СО РАН.

6. Утилизация низкопотенциальной теплоты стоков с температурой выше 25⁰С осу-

ществляется с помощью теплонасосной техники.

7. Угольные разрезы разрабатываются с помощью техники непрерывного действия.

8. Используются закрытые склады топлива с системой пылеподавления и гидросмывом.

Изложенное в п.п. 1 ÷ 8 сочетает в себе решение двух важных народнохозяйственных проблем: создание экологически чистой и максимально экономичной тепловой электростанции как основы развития энергетики будущего и производство минеральных удобрений наиболее экономичным и экологически чистым способом.

Технологическая схема энергоблока на КАУ в концепции энергоагропромкомплеса

Такая схема с использованием п.п. 1–8 представлена на рис. 2.1. В табл. 2.1 приведён перечень показателей ЭЧТЭС в сравнении с действующей Берёзовской ГРЭС, показывающий существенные эколого-экономические преимущества разрабатываемой ТЭС с природоохранными технологиями.

Таблица 2.1 - Перечень основных показателей экологически чистой ТЭС и их сравнение с действующей Березовской ГРЭС

Показатель	Экологически чистая ТЭС		Берёзовская ГРЭС-1
	“сухой” способ	“мокрый” способ	
1	2	3	4
Электрическая мощность ТЭС, МВт:			
Проектная	6400		6400
Единичная	800		800
Характеристики основного тепломеханического оборудования:			
Парогенератор:			
Паропроизводительность, т/ч	2650		2650
Давление пара, кг/см ²	250		250
Температура пара, °С	545		545
Турбоустановка К-800-240-5:			
Мощность, МВт	800		800
Давление пара, кг/см ²	240		240
Температура пара, °С	540		540
Температура промежуточного перегрева, °С	540		540
Генератор:			
Мощность, МВт	800		800
Использование отходов основной и природоохранной технологии:			
Производство минеральных удобрений, тыс. т/г,			
в том числе: азотных	620	486	600
известковых	240	106	-
Прибыль от реализации минеральных удобрений, тыс. руб./г,	380	380	600
в том числе: азотных	2890	2010	1500
известковых	1940	1060	-
	950	950	1500
Производство строительных материалов, тыс. т. золы в год	890	857	500
Бетонные конструкции и детали, тыс. м ³ /г	309	309	-
Силикатный кирпич, тыс.т/г	284	284	-
Вяжущие материалы, тыс. т/г	155	155	-
Цементная промышленность (золы), тыс. т/г	111	111	-
Дорожное строительство, тыс. т/г	1124	1091	-
Прибыль о реализации стройматериалов, тыс. т/г	5600	5390	3150
Использование зол в сельском хозяйстве для производства сырьевых гранул, тыс. т/г	380		600
Прибыль от использования зол, коп/(квт ч)	0,0023		0,0036
Общая прибыль от реализации твёрдых отходов, тыс. руб./г	8496	7400	4650

ПРИРОДООРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЭС НА СИБИРСКИХ УГЛЯХ

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Ожидаемые (расчётные) технико-экономические показатели:			
- Удельные капитальные вложения в сооружение ТЭС, руб./кВт	200,9		191,9
-Удельная численность промышленно-производственного персонала, чел/кВт	0,38		0,38
- Эксплуатационный КПД (нетто) электростанции, %	38		38
- Среднегодовой удельный расход топлива, г/(кВт ч)	323		323
- КПД энергоустановки при номинальной мощности, %	0,39		0,39
-Приведённые затраты на производство электроэнергии, коп/(кВт ч)	0,85		0,83

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЭС НА КУЗНЕЦКИХ УГЛЯХ

Основные характеристики Кузнецких углей

Кузнецкие энергетические угли имеют относительно высокое качество и успешно сжигаются на ТЭС не только в близлежащих регионах, но и в Европейской части страны. Однако сжигание этих углей на ТЭС может вызывать значительные трудности, особенно на неприспособленном для этого оборудовании, из-за значительных колебаний физико-химических и теплотехнических свойств и специфики углей некоторых месторождений. Подчеркнём ещё раз, что основная сложность организации использования кузнецких энергетических углей обусловлена нестабильностью их состава и свойств.

Одним из факторов, ограничивающих спектр применения кузнецких углей, являются реакционные свойства топлива. Для углей более с высокими реакционными свойствами (марки Г, Д) необходимо выполнить мероприятия по повышению взрывобезопасности пылесистем. Более сложной проблемой ока-

жется обеспечение устойчивости и экономичности сжигания менее реакционных углей (марки СС2, Т).

Кузнецкие угли имеют повышенную склонность к шлакованию поверхностей нагрева, поэтому должны быть ограничены тепловые и радиационные потоки. Они обладают меньшим содержанием серы и более высоким содержанием азота, что предопределяет повышенный выход топливных окислов азота.

Концептуальные основы экологически чистой ТЭЦ с технологией сжигания в циркулирующем кипящем слое

Представлена концепция экологически чистой ТЭЦ на кузнецких углях с использованием новых для российской энергетики котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем.

Технология сжигания дроблёного угля в циркулирующем слое обеспечивает уровень выбросов по NO_x и SO_x удовлетворяющий самым жёстким санитарным нормам. Технологическая схема такой ТЭС представлена на рис. 3.1

ПРИРОДООРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЭС НА СИБИРСКИХ УГЛЯХ

Таблица 3.1. - Основные технические характеристики и ожидаемые технико-экономические показатели

Наименование показателей	Единица измерения	Ожидаемые технико-экономические показатели
Проектная электрическая мощность (числитель – при номинальной мощности турбин; знаменатель – при максимальной мощности турбин)	МВт	1295/1540
Проектная тепловая мощность	Гкал/ч	3500
Мощность турбины: -электрическая - тепловая	МВт Гкал	185/220 290
Котла энергетического	т\ч (Гкал/ч)	500(300)
Котла пикового	т\ч (Гкал/ч)	160(96)
Тип турбин		Т-185/220-130-5 УТМЗ
Тип котлов энергетических		Е-500-13.8-560 ЦКС ПО «Сибэнергомаш»
Тип котлов пиковых		Е-160-1.4-300 ЦКС ПО «Сибэнергомаш»
Вид топлива		Уголь кузнецкий
Использование отходов основной и природоохранной технологии		Полное использование в качестве сырья для цветной металлургии, а также в стройиндустрии
Технология подготовки твёрдых отходов для передачи потребителям		Складирование сухой золы, полученной после низкотемпературного сжигания в топках с ЦКС и её частичное гранулирование
Прибыль от реализации отходов		По договорным ценам
Характеристика маневренности: -регулируемый диапазон энергоустановок;	%	Работа по тепловому графику с частичным изменением электрической мощности 70...100%
проектное количество остановов-пусков	1 год	20 на 1 котёл
Удельные капиталовложения в сооружение ТЭЦ (Числитель – при номинальной, знаменатель – при максимальной мощности турбин)	руб./кВт	445/375
Удельная численность промышленно-производственного персонала	чел./кВт	1,05
Среднегодовой удельный расход топлива	г у.т./кВт·ч	230
Себестоимость тепловой энергии	руб./Гкал	4,5
Затраты на НИР и ОКР при разработке проекта, головных образцов энергоустановок и природоохранных технологий	млн. руб.	См. в соответствующих разделах. 1,0...1,5 на испытания и доработку нового оборудования

Примечание. Оценка удельных капиталовложений и численности персонала приняты на основе расчётов по прогрессивным показателям технического уровня производства и строительных решений по ТЭЦ и котельным.

Таблица 3.2. - Дополнительные показатели

Наименование показателей	Единица измерения	Ожидаемые технико-экономические показатели
Сбросы в водные источники Водопотребление: - выход солей с жидкими стоками - содержание тяжёлых металлов в стоках - потребление свежей воды на технологические нужды	кг/ч г/м ³ т/МВт	Жидкие стоки отсутствуют Отсутствуют 0,380
Реагенты для природоохранных технологий		Не требуется
Научно-техническая база для разработки проекта: - перечень технологий и оборудования, требующих предварительной проверки на опытно-промышленных установках - использование имеющихся отечественных и зарубежных аналогов - готовность машиностроительных отраслей к созданию новых типов оборудования и природоохранных технологий - научно-технические задачи, решение которых целесообразно осуществить в рамках сотрудничества с другими странами - перечень оборудования, материалов, реагентов, которые необходимо приобрести за рубежом		Сжигание топлива в ЦКС на опытно-промышленных котлах У-500-13,8-560 ЦКС Е-160-1,4-300 ЦКС В соответствующих отделах Промышленность имеет возможность производить новое оборудование Не требуется Не требуется

Ориентировочные технико-экономические показатели природоохранных технологий представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. - Основные технико-экономические показатели природоохранных технологий

Наименование Производств	Мощность, тыс. т	Цена руб./т	Себестоимость, руб./т	Капиталовложения, млн. руб.	Экономический эффект, млн. руб.	Срок окупаемости, лет
Производство спецвидов глинозёма	240	200	100	120	24	5
Производство сульфата алюминия	50	73	43	5	1,5	3,3
Производство ферросплавов	100	160	100	30	6	5
Производство жидкого стекла	500	70	50	34	10	3,4
Производство белого цемента	1000	27	23	20	4	5
Производство вяжущих материалов	600	20	14	18	3,6	5
Производство стекла	300	105	90	26	4,5	5,8
ИТОГО				253	53,6	4,7

ВЫВОДЫ

Обоснованы пути создания перспективных ТЭС с применением природоохранных и экологообеспечивающих технологий на Канско-Ачинских углях с позиций современных научно-технических достижений в области энергетики. Затраты на природоохранные технологии компенсируются положительными эффектами за счёт снижения ущерба, причиняемого выбросами и отходами ТЭС народному хозяйству, за счёт применения новой энерготехники, за счёт прибыли от реализации продуктов утилизации, полезным использованием сбросного тепла и др.

Применение прогрессивной технологии сжигания в вихревом потоке обеспечивает перспективные эколого-экономические показатели ТЭС. Помимо выработки электроэнергии и тепла собственно на ТЭС, из твёрдых, жидких и газовых выбросов выпускается на дополнительных предприятиях при ТЭС продукция, обладающая высокими потреби-

тельными свойствами. Техническая система, включающая собственно ТЭС и утилизирующие практически в полном объёме отходы на предприятиях при ТЭС – это многоотраслевой энергоагропромкомплекс.

Технически обоснована также концепция экологически чистой ТЭЦ на кузнецких углях на принципе энергоагропромкомплекса с использованием котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем. Технология сжигания дроблёного угля в циркулирующем слое обеспечивает уровень выбросов NO_x и SO_x , удовлетворяющих самым жёстким санитарным нормам.

Капитальные затраты на оборудование ТЭЦ с ЦКС по сравнению с традиционным сжиганием уменьшаются до 40%, а эксплуатационные – до 35% годовых издержек по производству электроэнергии и теплоты.

Создание и тиражирование экологически чистых ТЭС – магистральное направление отечественной и мировой угольной энергетики.