

# Парогазовые установки с газификацией угля

## **Проблемы:**

Экология (вредные выбросы)

Транспортировка угля (высокая составляющая стоимости)

Экономичность (КПД уступает газовым установкам)



**Установка систем  
газоочистки**



**Современные  
технологии  
сжигания твердого  
топлива**



**Строительство ТЭС  
на угольных  
месторождениях**

## Факельное сжигание

Ребёрнинг

НТВ, ВИР и др. технологии

ССКД с системами газоочистки

## Газификация твёрдого топлива

Газификация под давлением и без

Газификация + ПГУ

Газификация в шлаковом расплаве

## Кипящий слой

Кипящий слой

Циркулирующий кипящий слой

## Опыт

- Первая установка по газификации угля в 1978 г.
- Первая установка газификации нефтяного кокса в 1984 г.
- 30 газовых турбин, работающих на синтетическом газе ...  
> 1 миллиона часов работы
- Лидер по IGCC... >3 ГВт по технологиям GE Energy
- 40 глобальных проектов по отделению CO<sub>2</sub>

## Газификация

### Технология газификации



Сингаз

(H<sub>2</sub> + CO)

#### Сырье

- Уголь
- Нефтяной кокс
- Асфальт
- Тяжелая нефть
- Вакуумный остаток
- Природный газ

Электроэнергия (IGCC)

- ↳ Строительство «с нуля»
- ↳ Полигенерация
- ↳ Дополнительные мощности
- ↳ Реконструкция существующего пр-ва

НПЗ

- ↳ Водород
- ↳ Пар
- ↳ Электроэнергия

Химикаты

- ↳ Метанол
  - ↳ Формальдегид
  - ↳ МТБЭ
  - ↳ Уксусная кислота
  - ↳ Амины
  - ↳ DME
- ↳ Аммиак
  - ↳ Мочевина
  - ↳ Нитрат/ сульфат аммония
- ↳ Кислород-содержащие химикаты: бутанол, этилгексанол

Метанирование

- ↳ Замена природного газа

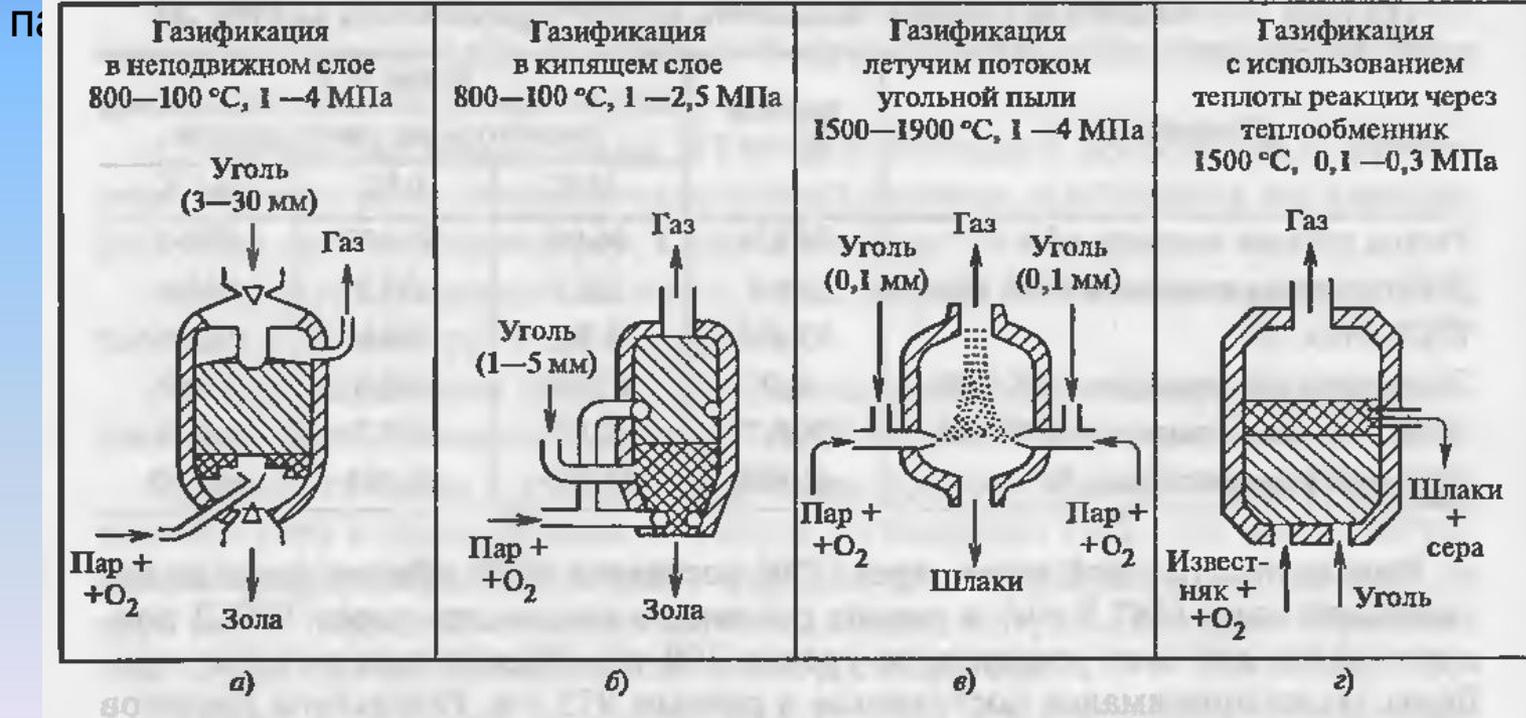
СЖТ

- ↳ Транспортное топливо

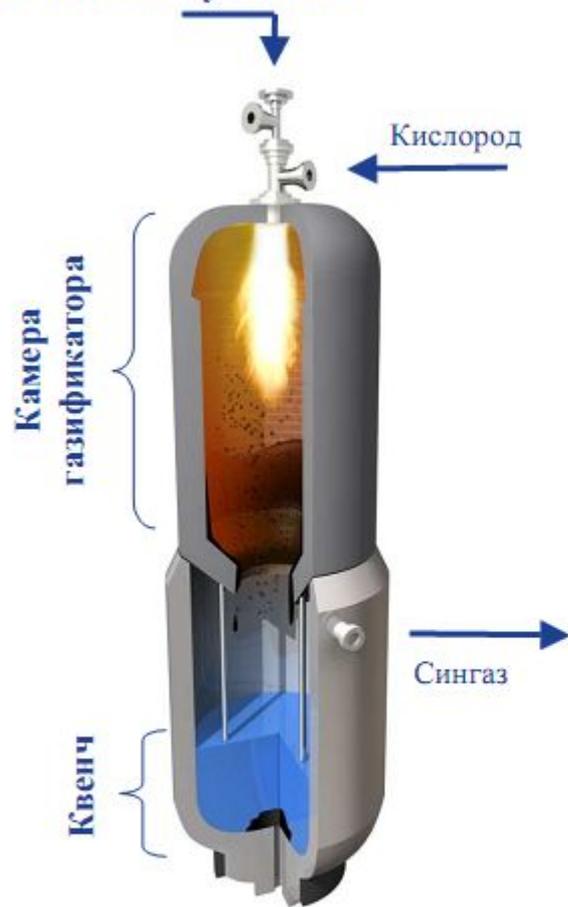
## ПГУ с внутрицикловой газификацией (ВЦГУ)

Суть заключается в превращении твердого топлива в синтетический газ.

Существуют разные технологии и способы газификации в газогенераторе. Работы в этом направлении выполнялись ЭНИН, ИВТАН, ЦКТИ, МЭИ. Наиболее часто используемая технология это



Уголь/ водяная суспензия



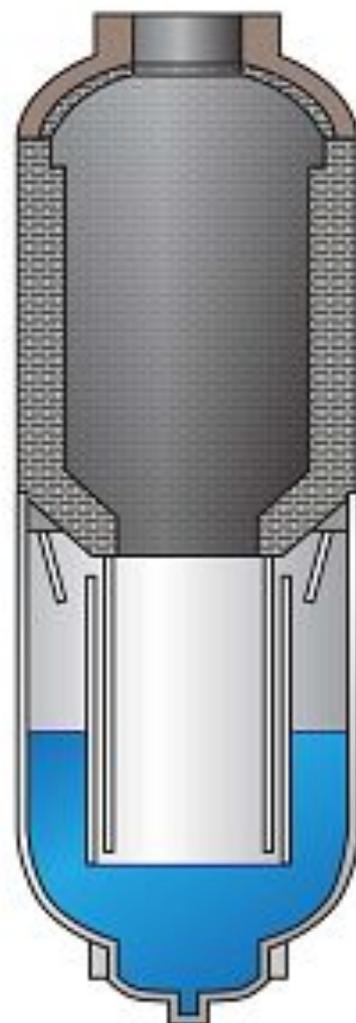
## Простая конфигурация системы

- Насосы водоугольной смеси
- Отсутствуют системы сушки угля
- Большой коэффициент  $H_2/CO$
- Не нужен дополнительный пар для реакции сдвига
- Выигрыш в размере для последующих систем

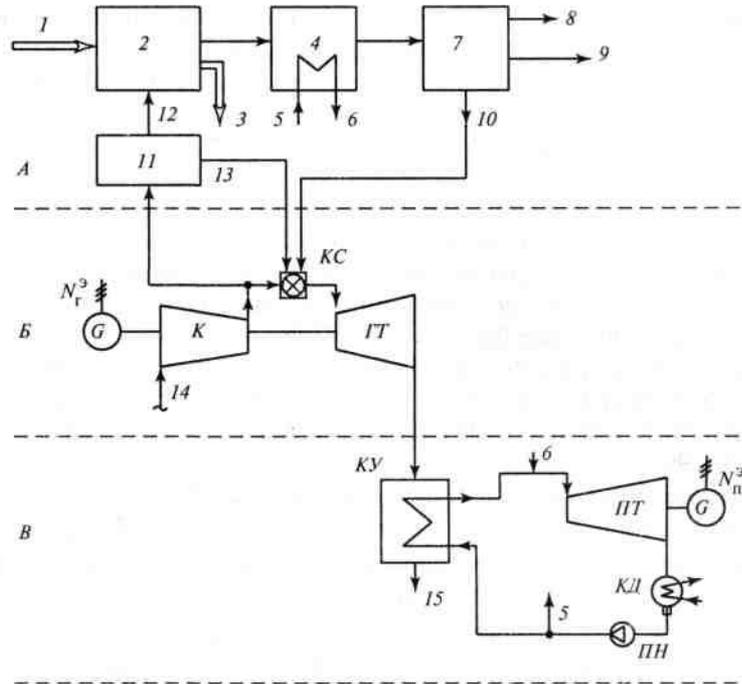
# Квенч газификатор GE

## Ключевые характеристики

- Высокопроизводительный охлаждаемый газификатор с вертикальным потоком процесса частичного окисления
- Простой сосуд высокого давления с возможностью локального изготовления
- Единый питающий инжектор с симметричным пламенем, минимизирующим износ огнеупора
- Огнеупор имеет невысокую стоимость и является надежным тепловым барьером
- Горячий синтетический газ немедленно охлаждается при непосредственном контакте с водой
- Синтетический газ теплый и насыщен водой... идеален для реакции сдвига CO → получение водорода
- Промышленное применение до 86 бар
- Проверенный и надежный размер газификатора до 25.5 м<sup>3</sup> (900 фут<sup>3</sup>)



# Схема парогазовой электростанции с ВЦГУ (IGCC)



## Комбинированный цикл с внутренней газификацией



### Упрощенная схема парогазовой электростанции с ВЦГУ

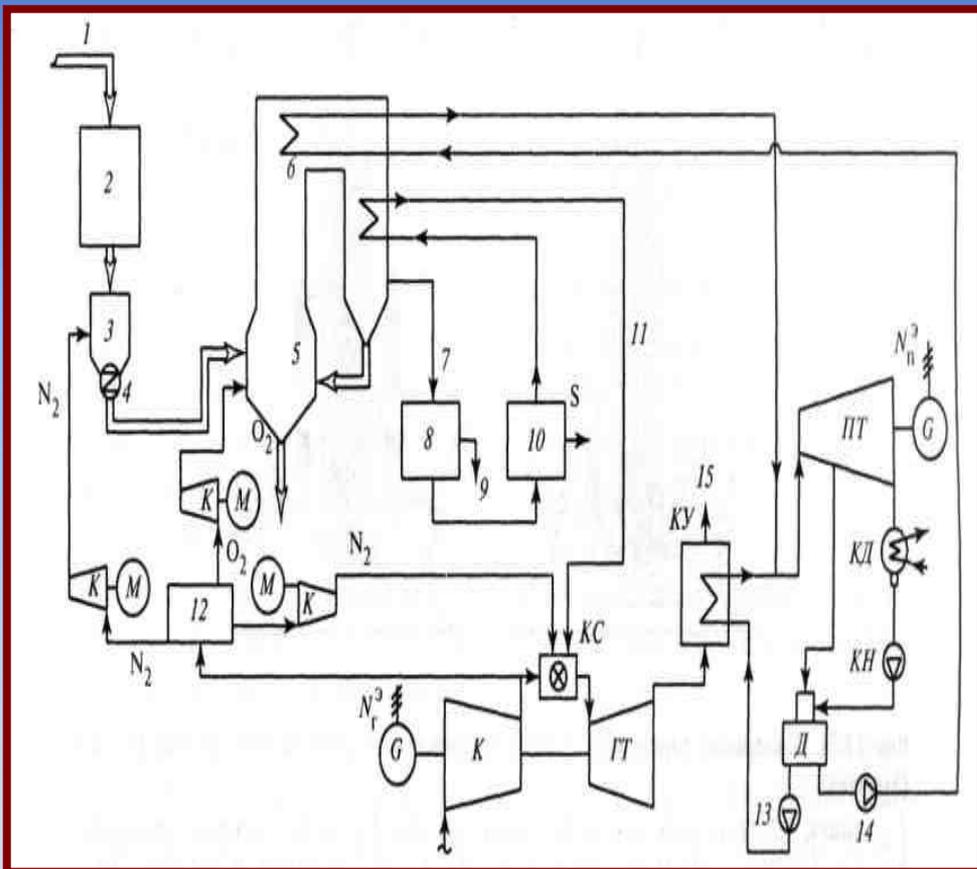
А — секция газификации угля и получения синтетического газа; Б — секция ГТУ; В — секция паросиловой установки; 1 — подача измельченного угля; 2 — газогенератор; 3 — удаление шлака; 4 — газоохладитель газогенератора; 5 — питательная вода; 6 — пар; 7 — газоочистка; 8 — элементарная сера; 9 — пыль; 10 — очищенный синтетический газ; 11 — установка расщепления воздуха; 12 —  $O_2$ ; 13 —  $N_2$ ; 14 — воздух; 15 — выходные газы в дымовую трубу

КПД таких установок составляет 45-46 %, собственные нужды здесь больше порядка 7-8 %. Эти установки дороги но нашли применение в мире, т.к. уголь дешевле.

## Особенности

- получаемый синтетический газ как правило с более низкой калорийностью чем природный
- получаемый газ «грязный», много примесей, поэтому необходима очистка.
- Система очистки работает на охлажденных газах, а на выходе из газогенератора мы имеем температуру больше 1000 С. Поэтому устанавливается еще один элемент охладитель газогенератора работающий на воде из цикла ПТУ.
- В результате газификации имеются потери в газогенераторе с КПД хим. Менше 0,9
- Количество теплоты получаемого за счет окисления сравнимо с теплотой при конденсации

## Тепловая схема пылеугольного парогазового энергоблока с ВЦГУ (метод PREN-FLO)



На испанской ТЭС Puertollano под Мадридом с участием фирмы Siemens построен парогазовый энергоблок с ВЦГУ мощностью 320 МВт. Уголь обрабатывается в мельницах до получения мелкой угольной пыли и при контролируемой подаче окислителя  $O_2$  с установки расщепления воздуха после компрессора ГТУ методом PRENFLO (PReSSurized ENtrained FLOW) частично окисляется до получения синтетического газа (см. рис. 11.27, в). Принципиальная тепловая схема энергоблока включает в себя установку подготовки угля, газогенератор с системой очистки газа, систему расщепления воздуха, энергетическую ГТУ, КУ и ПТУ (рис. 11.29). КПД производства электроэнергии данного энергоблока при низких выбросах вредных веществ составляет не менее 45%. Новые разработки ведущих фирм в этой области должны обеспечить КПД нетто ПГУ с ВЦГУ выше 50%.

### Тепловая схема пылеугольного парогазового энергоблока с ВЦГУ (метод PREN-FLO)

1 — уголь; 2 — установка дробления и сушки угля; 3 — бункер; 4 — питатель угля; 5 — газогенератор; 6 — испарительные и пароперегревательные поверхности нагрева газогенератора; 7 — неочищенный синтетический газ; 8 — промывка газа; 9 — сточная вода; 10 — удаление серы из газа; 11 — очищенный синтетический газ; 12 — установка расщепления воздуха; 13 — питательный насос КУ; 14 — питательный насос газогенератора; 15 — выходные газы КУ в дымовую трубу

За рубежом эксплуатируются, строятся и проектируются более 70 парогазовых установок с внутрицикловой газификацией твердого топлива, основанной на различных процессах (Тексако, Шелл, Пренфло, Бритиш Гес-Лурги, высокотемпературный Винклер и др.) с использованием, как правило, парокислородного дутья. Среди действующих ПГУ с ВЦГУ можно назвать ПГУ с ВЦГУ мощностью 284 МВт (брутто) (ТЭС «Buggenum», Нидерланды) с газификацией угольной пыли под давлением 2,5 МПа – 1994 г., ПГУ с ВЦГУ мощностью 262 МВт (ТЭС «WaBash River», США) впервые была пущена на угле в августе 1995 г., ПГУ с ВЦГУ мощностью 250 МВт на ТЭС «Polk» (США) с газификатором Техасо на воздушном дутье и ГТУ 7FA – с 1997 г., ПГУ с ВЦГУ мощностью 107 МВт брутто (ТЭС «Pinon Pine», США) с ГТУ 6FA и газификатором KRW с кипящим слоем – 1997 г.

В России на сегодняшний день имеются два выполненных проекта ПГУ с ВЦГУ мощностью 250 МВт для Ново-Тульской ТЭЦ на базе ГТЭ-45-2 с  $T_3=850^{\circ}\text{C}$  (в объеме рабочей документации на строительство и изготовление оборудования) и мощностью 370 МВт для Кировской ТЭЦ-5 на базе ГТЭ-115-2 с  $T_3=1070^{\circ}\text{C}$  (в объеме технорабочих проектов оборудования и тех.документации на строительство).

# Парогазовые установки со сжиганием угля в кипящем слое

## Принцип действия котла с кипящим слоем

Материал слоя приводится во взвешенное состояние (т. наз. "кипящий слой") путем продувания воздуха через вещество слоя, лежащее на решетке (распределителе воздуха). Кипящий слой можно условно разделить на три категории в зависимости от скорости вдуваемого воздуха. По мере увеличения скорости продуваемого воздуха слой изменяется от фиксированного, через пузырьковый, до циркулирующего кипящего слоя.

Пузырьковый слой наблюдается при скоростях воздуха менее 2-3 м/с, в этом случае граница слоя четко видна.

При более высоких скоростях воздуха слой расширяется, и некоторые частицы уносятся из слоя вместе с газом. В этом случае не существует четкой границы слоя, и его плотность уменьшается с высотой. Самые крупные из уносимых частиц отделяются циклоном и возвращаются обратно в кипящий слой. В этом заключается принцип действия циркулирующего кипящего слоя, на основе которого работают ЦКС-котлы. Скорость воздуха составляет около 5 м/с. Обычно сжигание происходит при температуре слоя 850°С - 900°С.

При сжигании низкосольного топлива в качестве материала слоя используется песок. Если топливо содержит серу, то для ее связывания в топку добавляется известняк, и в этом случае материал слоя состоит из смеси топливной золы и известняка.

Котел с ЦКС имеет широкий диапазон регулирования, который позволяет нести нагрузку от 50 до 100 % номинальной мощности.

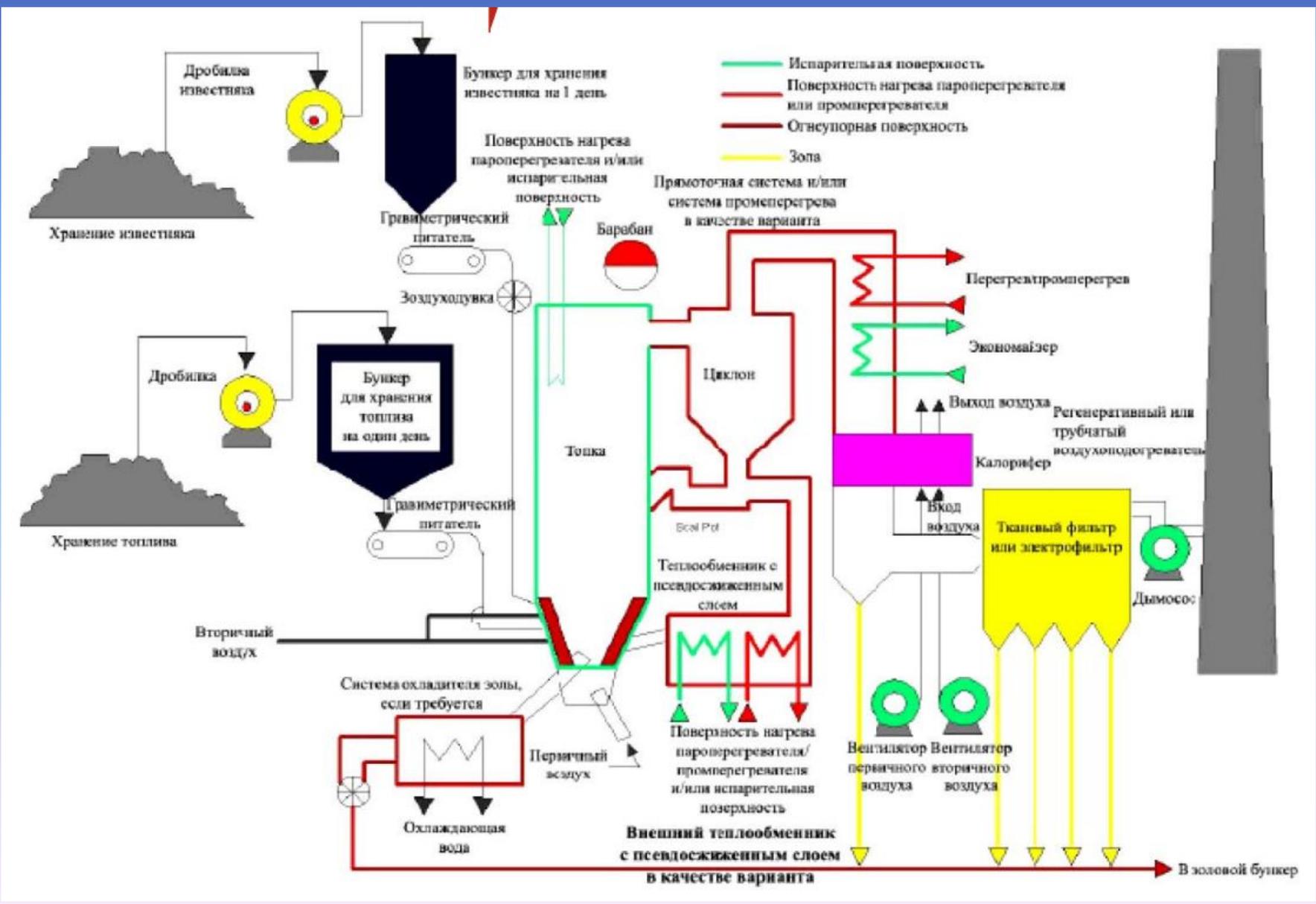
На сегодняшний день технология циркулирующего кипящего слоя является наиболее эффективной как в плане использования широкой гаммы топлива, так и в области соответствия экологическим стандартам.

Реконструкция паросиловых энергоблоков позволяет повысить КПД блока с 31 % до 41,34 %

## КРУПНЕЙШИЕ КОТЛЫ С ЦКС НА ПОВЫШЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

| Объект                | Поставщик     | Мощность блока, МВт | Расход пара, т/час | Давление пара, МПа | Температура пара, °С |
|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Прованс, Франция      | Альстом       | 250                 | 700/               | 16,3/              | 567/563              |
| Ред Хиллс, США        | Альстом       | 2*250               | 753/               | 20,3/              | 568/541              |
| Зульцис, Италия       | Альстом       | 340                 | 1013/83<br>6       | 19,7/              | 565/580              |
| Шеннонбридж, Ирландия | Фостер-Уиллер | 159                 | 407/354            | 17/3,48            | 563/563              |
| Туров, Польша         | Фостер-Уиллер | 3*262               | 704/650            | 17/3,94            | 568/568              |
| Логижа, Польша        | Фостер-Уиллер | 460                 | 1300/10<br>80      | 28,26/5,13         | 563/583              |

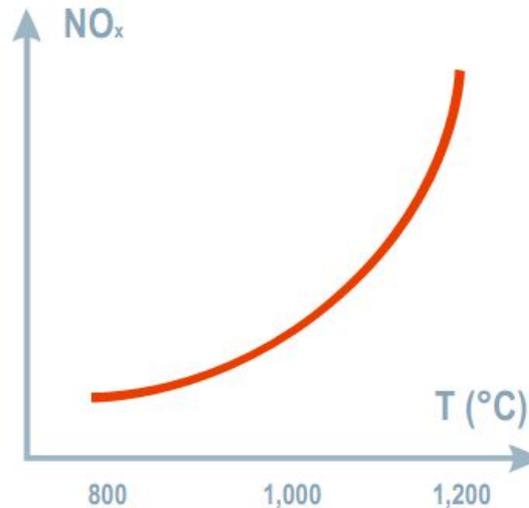
# КОТЕЛ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



На выбросы NO<sub>x</sub> влияют четыре основных параметра:

- Температура горения
- Химическая активность топлива
- N в топливе
- Избыточный воздух и ступенчатое изменение воздуха

Низкие выбросы NO<sub>x</sub> поддерживаются с помощью равномерной низкой температуры в топочно-циклонном контуре инертных материалов.



Технология ЦКС позволяет сжигать с высокой экономичностью широкую гамму твёрдого топлива с низкими требованиями к качеству топлива

Технология ЦКС снижает выбросы загрязняющих веществ из котла

Оптимальная температура:  
830°C – 870°C

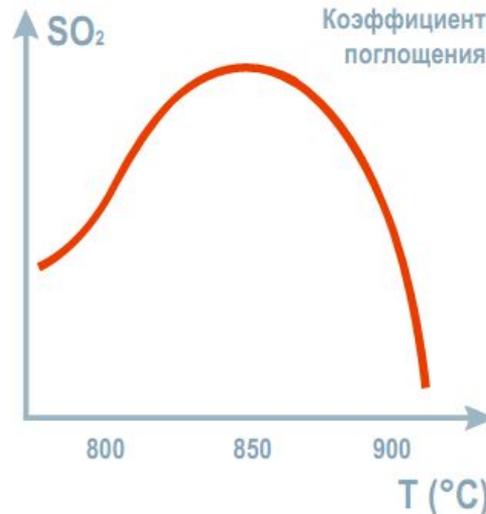
в зависимости от топлива и известняка

Поглощение SO<sub>2</sub> за счет впрыска дробленого известняка



Регулирование температуры в топке в широком диапазоне рабочей нагрузки является важным для управления химической реакцией.

Расход известняка меняется в зависимости от температуры в топке



Технология ЦКС предполагает компактные размеры котельной установки, снижение стоимости строительства за счёт исключения систем серо-и азотоочистки

Технология ЦКС позволяет сжигать не только угли, но и нефтяной кокс, торф, сланцы, различные виды биомассы

Энергоблоки, оснащенные котлами с циркулирующим кипящим слоем, эксплуатируются по всему миру с 80-х годов. Наибольшее распространение данная технология получила в районах с низким качеством используемого топлива. На сегодняшний день большую часть рынка котлов с ЦКС представляют фирмы: "Альстом" и "ФостерВилер". С 2000 года этими компаниями реализовано 8 проектов энергоблоков с ЦКС мощностью порядка 300 МВт.

"АЛЬСТОМ":

1998г. Южная Корея 2×220 МВт, 173 ата/541/541°C

2001г. США 2×250 МВт, 184 ата/568/541°C

2003г. Китай 3×135 МВт, 138 ата/540/540°C

2007г. (проект) Китай 1×300 МВт, 175 ата/540/540°C

"ФостерВилер":

2000г. Польша 1×235 МВт, 130 ата/540/540°C

2001г. Япония 1×150 МВт, 170 ата/569/541°C

2001г. США 2×300 МВт, 180 ата/540/540°C

2003г. Польша 3×262 МВт, 170 ата/568/568°C

2004г. Ирландия 1×150 МВт, 170 ата/563/563°C

2007г. (проект) Польша 1×460 МВт, 275 ата/565/580°C

Обе компании имеют положительный опыт реализации проектов с использованием антрацитовых углей с низким выходом летучих веществ ( $V_f \leq 7\%$ ).

## Технические характеристики котлов

| Наименование показателя      | Единицы измерения  | Техническое задание | "ФостерВилер" | "Альстом"  |
|------------------------------|--------------------|---------------------|---------------|------------|
| Паропроизводительность       | т/час              | 900-1000            | 1000          | 892 (1000) |
| Давление за котлом           | кг/см <sup>2</sup> | 250                 | 252           | 250        |
| Температура острого пара     | °С                 | 580                 | 580           | 580        |
| Температура вторичного пара  | °С                 | 580                 | 600           | 580        |
| Давление питательной воды    | кг/см <sup>2</sup> | -                   | 285           | 281        |
| концентрация NO <sub>x</sub> | мг/м <sup>3</sup>  | 400                 | 400           | 400        |
| концентрация SO <sub>2</sub> | мг/м <sup>3</sup>  | 400                 | 150           | 400        |
| концентрация СО              | мг/м <sup>3</sup>  | 100                 | 100           | 250        |
| концентрация твердых частиц  | мг/м <sup>3</sup>  | 50                  | 50            | 50         |
| Диапазон регулирования       | %                  | 30-100              | 55-100        | 50-100     |
| КПД нетто (DIN 1945)         | %                  | >90                 | 90,19         | 90         |

## Технические характеристики турбин

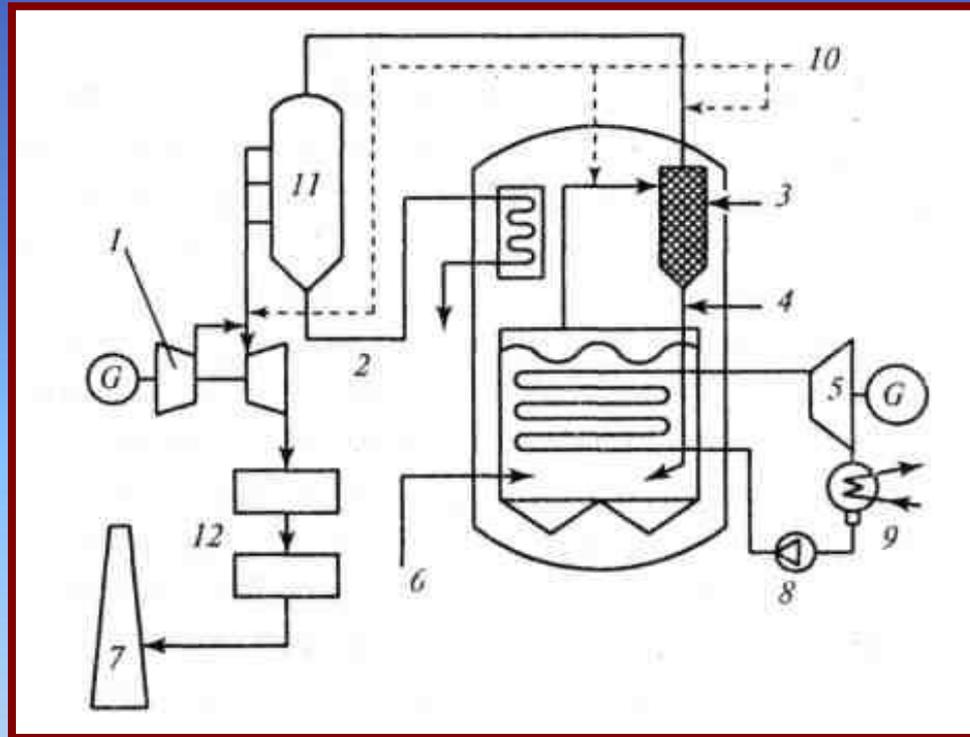
| Наименование показателя                   | Единицы измерения  | Техническое задание | ЛМЗ<br>К-330-250 | "Турбоатом"<br>К-350-28,4 | "Альстом"<br>DKY3-2N |
|---|--------------------|---------------------|------------------|---------------------------|----------------------|
| Мощность                                  | МВт                | ≤330                | 330              | 350                       | 330                  |
| Давление перед турбиной                   | кг/см <sup>2</sup> | 250                 | 250              | 290                       | 250                  |
| Температура острого пара                  | °С                 | 580                 | 580              | 580                       | 580                  |
| Температура вторичного пара               | °С                 | 580                 | 580              | 580                       | 580                  |
| Удельный расход тепла на турбину (брутто) | ккал/кВт           | ≤1720               | 1719             | 1718                      | 1719                 |

*ВТИ определил КПД котлов компании "Альстом" и "Фостер-Уиллер" по отечественным методикам исходя из представленных компаниями данных по топливу, параметрам пара и температуре уходящих газов. В результате расчетный КПД брутто составил 91,3 % и 91,1 % (эксплуатационный – 90,8 % и 90,6 %). Причиной более высокого КПД котла "Альстом" является сниженная до 123<sup>0</sup>С температура уходящих газов (131<sup>0</sup>С у "Фостер-Уиллер") и несколько меньшая принятая зольность.*

*По оценкам собственные нужды блока 330 МВт с котлом компании "Альстом" равны 26,47 МВт, а компании "Фостер-Уиллер" – 26,37 МВт.*

**Расчетный КПД блока на расход условного топлива по данным расчетов ВТИ при параметрах пара: давление 25 МПа, температура 580/580<sup>0</sup>С**

| № п.п. | Показатели,<br>единицы<br>измерения | Альстом | Альстом   | Фостер | Фостер    | Альстом |
|--------|-------------------------------------|---------|-----------|--------|-----------|---------|
|        |                                     | ЛМЗ     | Турбоатом | ЛМЗ    | Турбоатом | Альстом |
| 1      | КПД <sub>к</sub> , %                | 91,30   | 91,30     | 91,10  | 91,10     | 91,30   |
| 2      | q, ккал/ кВт·ч<br>(нетто)           | 1741    | 1740      | 1741   | 1740      | 1741    |
| 3      | α <sub>сн</sub> , %                 | 8,02    | 8,02      | 7,99   | 7,99      | 8,02    |
| 4      | КПД <sub>тп</sub> , %               | 98,9    | 98,9      | 98,9   | 98,9      | 98,9    |
| 5      | b, г.у.т./кВт.ч                     | 297,53  | 297,36    | 298,11 | 297,93    | 297,53  |
| 6      | КПД <sub>БЛ (нетто)</sub> , %       | 41,34   | 41,36     | 41,26  | 41,28     | 41,34   |



**Технологическая схема ПГУ с циркулирующим кипящим слоем (фирма EPDS, Япония)**

1 — ГТУ; 2 — зола; 3 — циклон циркуляции золы (два); 4 — вертикальные трубы (две); 5 — паровая турбина с электрогенератором; 6 — подача угля, известняка, воды; 7 — дымовая труба; 8 — насос; 9 — конденсатор; 10 — селективное некаталитическое восстановление  $\text{NO}_x$ ;

11 — циклон; 12 — очистка дымовых газов