Анализ применимости существующих и перспективных энергоустановок и систем газоочистки для различных видов угля Сибирского и Дальневосточного федеральных округов

30.09.2026 к.т.н., Чернов Сергей Львович Доцент кафедры ТЭС

Содержание

1. Анализ характеристик углей СФО и ДФО.

2. Оценка применимости технологий энергетического использования угля для ресурсной базы СФО и ДФО.

3. Оценка необходимости применения и требуемой эффективности систем газоочистки для новых угольных энергоблоков СФО и ДФО.

Анализ характеристик углей СФО и ДФО

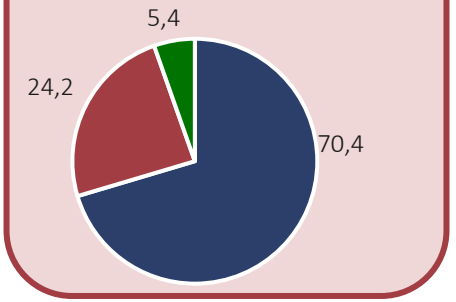
Структура потребления угля в России

Общая добыча угля в России 100% - 389,9 млн т

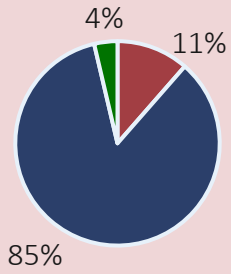
Внутренний рынок России 53% - 206,7 млн т

Экспорт 47% - 183,3 млн т

Процент от общей добычи за 01.01.2024 г, %



Экспорт за 2024 г, %



■ Каменный ■ Бурый ■ Антрацит

Распределение внутреннего рынка на 01.01.2024 г.

Электроэнергетика 50% - 103,3 млн т

Кокс-хим. и металлургическая промышленность 22% - 45,5 млн т

Нужды населения и коммунально-бытовые потребители 14% - 28,9 млн т

Прочие потребители 14% - 28,9 млн т

Основные конечные потребители

- ООО «Сибирская генерирующая компания»
- АО «Иркутскэнерго»
- ООО «Кузбасская энергокомпания»
- АО «Каскад-энерго»
- ПАО «Интер РАО»
- АО «ДГК»

- АО «Евраз ЗСМК»
- АО «Евраз НТМК»
- ООО «Мечел-Кокс»
- АО «Московский косовогазовый з-д»
- ООО «Мечел-Энерго»
- ПАО «Ижсталь»
- ОАО «Губахинский кокс»
- Череповецкий МК
- ПАО «Кокс»

- ООО «Красноярский цемент»
- ООО «Тимлюйцемент»

- Электроэнергетика является крупнейшим потребителем угля на внутреннем рынке России – около 50% внутреннего потребления и порядка 25% общей добычи.
- В структуре добычи преобладают каменные угли; к наиболее распространенным по объемам добычи относятся марки Д, Ж, Г, Т и ДГ.
- Дальнейшее развитие угольной генерации требует возможности эффективного использования широкой ресурсной базы, в том числе низкокалорийных, высокозольных и других низкокачественных углей.

Разработка специальной базы данных углей СФО и ДФО для проведения последующего технико-экономического анализа

База данных углей СФО и ДФО сформирована на основе систематизации и обработки данных ФГБУ «Росгеолфонд» о балансовых запасах угля по состоянию на 2025 год и открытых источников.

Основные элементы структуры базы данных углей СФО и ДФО

Географическая и административная привязка

- Федеральный округ
- Субъект федерации
- Бассейн
- Угленосный район
- Месторождение
- Объект учета
- Участок

Минимальные единицы учета запасов угля в разработанной базе данных углей СФО и ДФО

Характеристики угля

1. Вид угля
2. Марка угля
3. Коксуемость
4. Зола, %
5. Сера, %
6. Низшая теплота сгорания, МДж/кг
7. Влага, %
8. Выход летучих, %

Состояние запасов

- Балансовые запасы

1. А – детально разведанные
2. В – предварительно разведанные
3. C_1 – разведанные
4. C_2 – предварительно оцененные

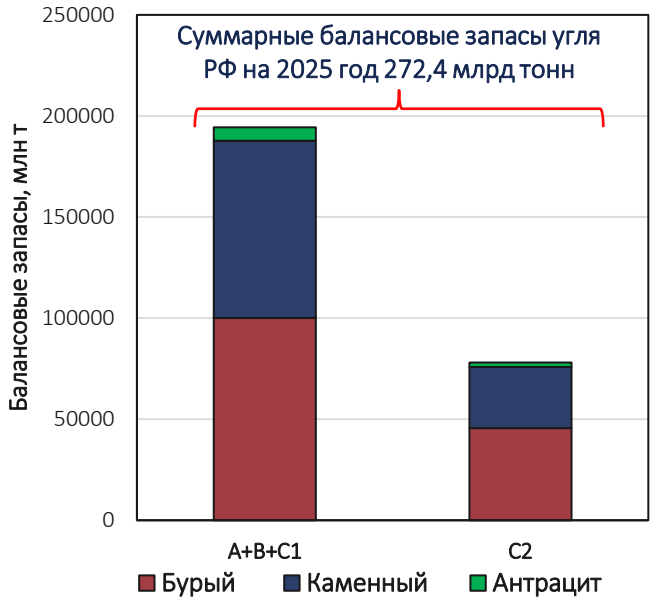
- Забалансовые – запасы, разработка которых в данный момент экономически нецелесообразна.

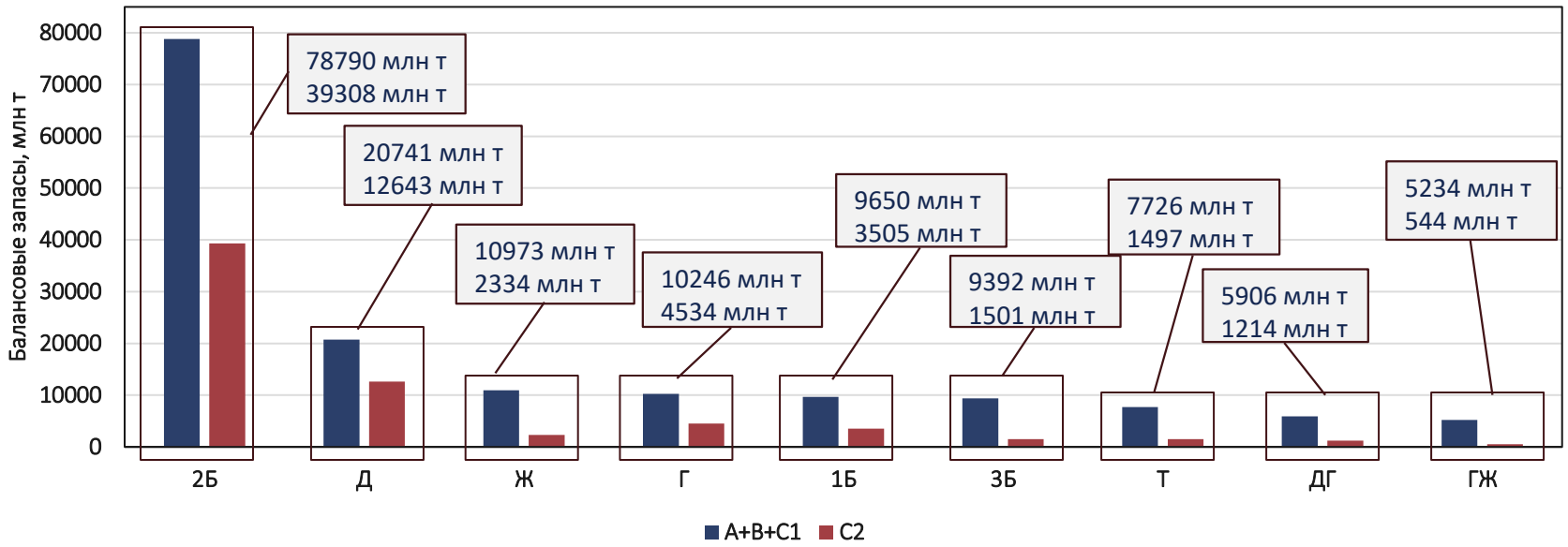
Единая запись базы данных по каждой минимальной единице учета

Для каждой записи систематизированы сведения о местоположении, 8 качественных характеристиках угля и объемах запасов категорий А, В, C_1 и C_2

Полученная база данных используется далее для анализа, выбора технологий энергетического использования угля и оценки требований к газоочистке.

Распределение балансовых запасов угля России





Структура ресурсной базы России определяется преобладанием бурых и каменных углей, формирующих большую часть балансовых запасов.

Общий объем

272, 4 млрд тонн

При текущем уровне добычи запасов хватит более чем на 500 лет.

Бурые угли

51,5% запасов

Основная марка: 2Б. Целесообразно использовать вблизи места добычи.

Каменные угли

45,1% запасов

Основные марки: Д, Г, ГЖ, Ж, К. Широко применяются в энергетике и металлургии.

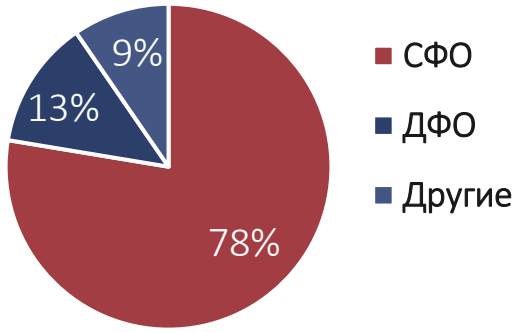
Антрацит

3,4% запасов

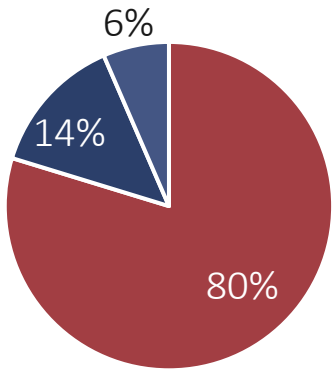
Представлен преимущественно маркой 2А.

Роль СФО и ДФО в структуре балансовых запасов угля России

Распределение запасов угля категории A+B+C_1 по РФ

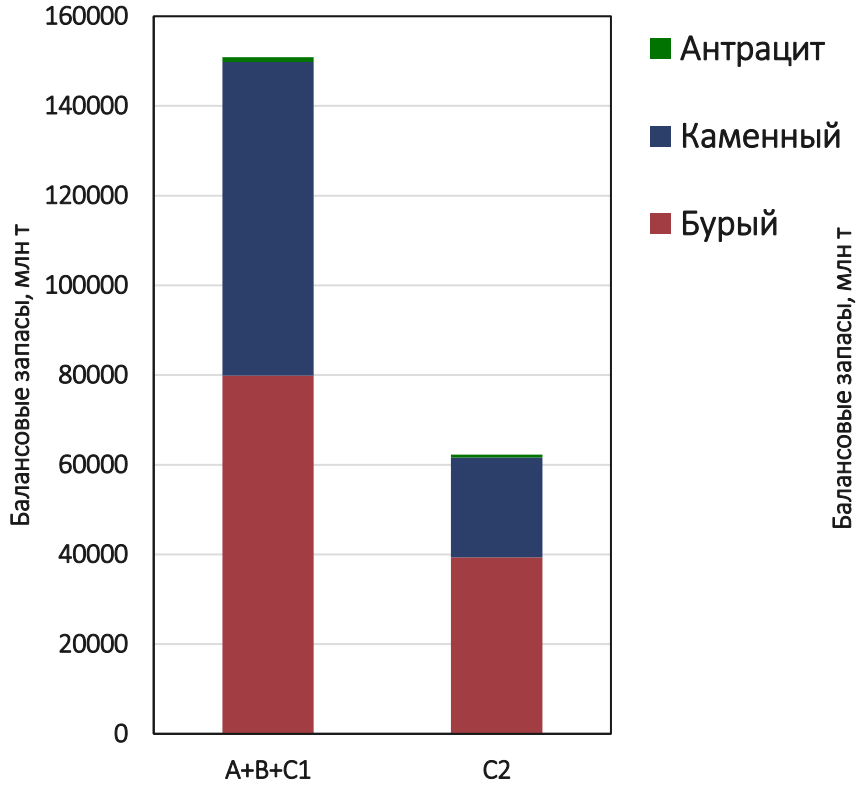


Распределение запасов угля категории C_2 по РФ

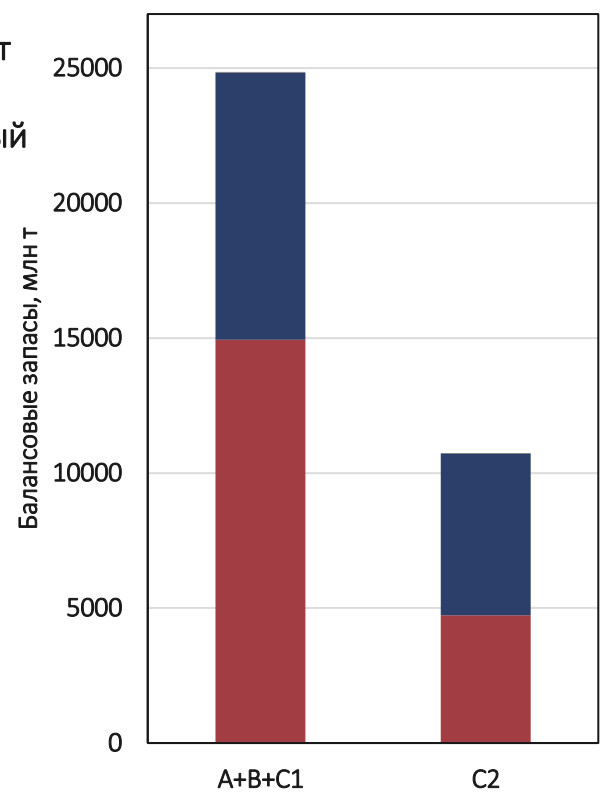


СФО И ДФО концентрируют около 91,3% балансовых запасов угля РФ. На СФО приходится 213,1 млрд, на ДФО – 35,6 млрд т.

Распределение балансовых запасов угля СФО по типу

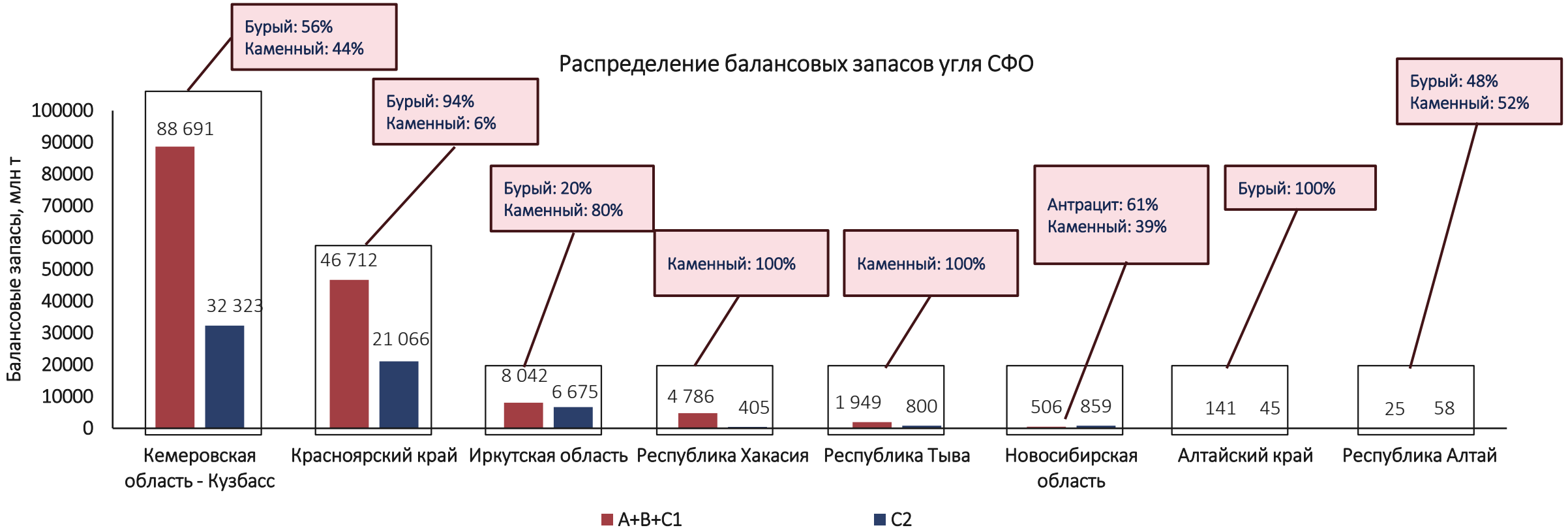


Распределение балансовых запасов угля ДФО по типу



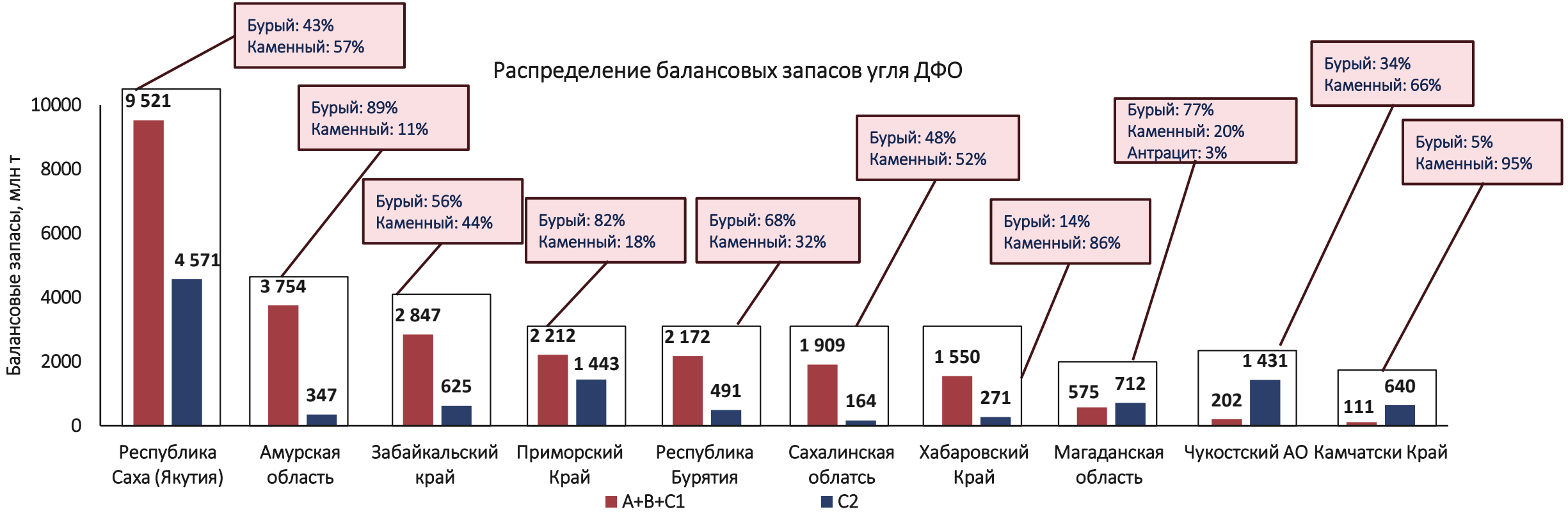
В СФО порядка 56,0% запасов приходится на бурые угли, 43,2% - на каменные и около 0,8% - на антрациты. В ДФО – около 55,2%, 44,6% и 0,2% соответственно.

Распределение балансовых запасов угля между субъектами СФО



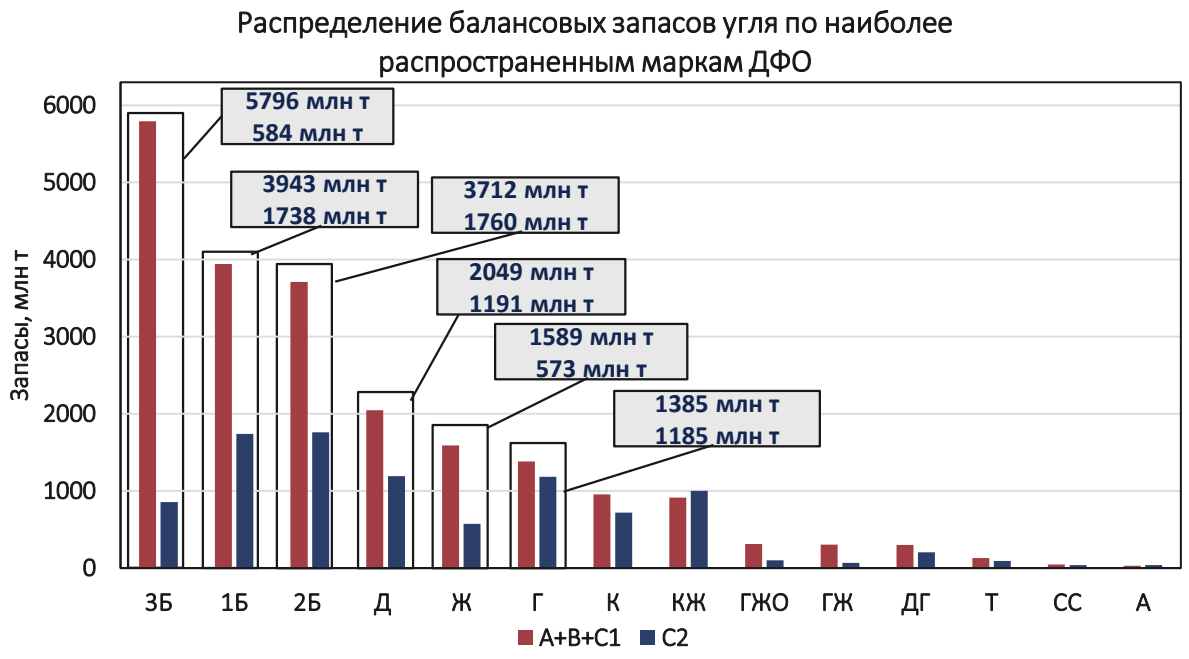
Чуть более 95% балансовых запасов угля СФО сосредоточено в трех регионах: Кемеровской области – Кузбассе (≈121,0 млрд т), Красноярском крае (≈67,8 млрд т) и Иркутской области (≈14,7 млрд т). На остальные субъекты округа приходится менее 5% запасов.

Распределение балансовых запасов угля между субъектами ДФО



В отличие от СФО, где основная часть запасов сконцентрирована в трех регионах, ресурсная база ДФО распределена более равномерно: три крупнейших субъекта приходится порядка 61% балансовых запасов округа – Республика Саха (Якутия) ≈14,1 млрд т, Амурская область ≈4,1 млрд т и Приморский край ≈3,7 млрд т.

Распределение балансовых запасов угля в СФО и ДФО по наиболее распространенным маркам



Для определения границ применимости перспективных технологий генерации проанализированы данные запасов углей по наиболее распространенным и промышленно значимым маркам, представленным на территории СФО и ДФО. В число рассмотренных марок входят: 1Б, 2Б, 3Б, Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж, К, КЖ, КС, СС, Т и А. Перечисленные марки угля формируют основную часть разведанной ресурсной базы регионов (чуть более 93 и 85% суммарных запасов в СФО и ДФО соответственно).

Оценка применимости технологий энергетического использования угля для ресурсной базы СФО и ДФО

Сравнительная характеристика технологий энергетического использования угля

Критерий	Факельное сжигание	Сжигание в кипящем слое	Газификация с последующим сжиганием генераторного газа в топливосжигающем устройстве
Технологическая зрелость	Освоенная технология в мире	Освоенная технология в мире; в РФ – ограниченный опыт эксплуатации	Ограниченный промышленный опыт в Китае, Японии, Республике Корея, США, Нидерландах и Испании
Экологические характеристики	Выбросы NOx: высокие Выбросы SOx: высокие Выбросы золы: высокие	Выбросы NOx: низкие Выбросы SOx: средние Выбросы золы: высокие	Выбросы NOx: средние Выбросы SOx: низкие Выбросы золы: низкие
Эксплуатационные особенности	Высокая эксплуатационная надежность; наиболее отработанная технология	Низкая эксплуатационная надежность; повышенные требования к контролю эрозионного износа (сжигание плохих углей)	Более сложная эксплуатация за счет взаимосвязанных систем газификации и очистки газа
Подготовка угля перед сжиганием	Требуются сушка (при необходимости) и тонкий размол	Тонкий размол не требуется; допускается более крупное и влажное топливо	Требуется отдельный комплекс подготовки и переработки угля*: подготовка топлива, газификация и очистка генераторного газа перед его сжиганием.

*В рамках работы для газификационных технологий рассматривается преимущественно поточная газификация, при которой уголь подается в газификатор в виде сухой пыли или водоугольной суспензии.

Различия в требованиях рассматриваемых технологий к топливу определяют необходимость выбора ключевых характеристик угля, позволяющих установить область их рационального применения.

Обоснование критериев предварительного выбора технологии энергетического использования угля

Основные характеристики угля

Теплота сгорания | **Влажность** | **Сернистость** | **Зольность** | **Выход летучих**

Выход летучих определяет реакционную способность и воспламеняемость топлива.

Теплота сгорания определяет энергетическую ценность и требуемый расход топлива.

Влажность учитывается при оценке сушки и теплового баланса установки.

Зольность характеризует содержание минерального балласта, влияющего на теплотехническую эффективность, шлакование, износ оборудования и нагрузку на системы золоулавливания.

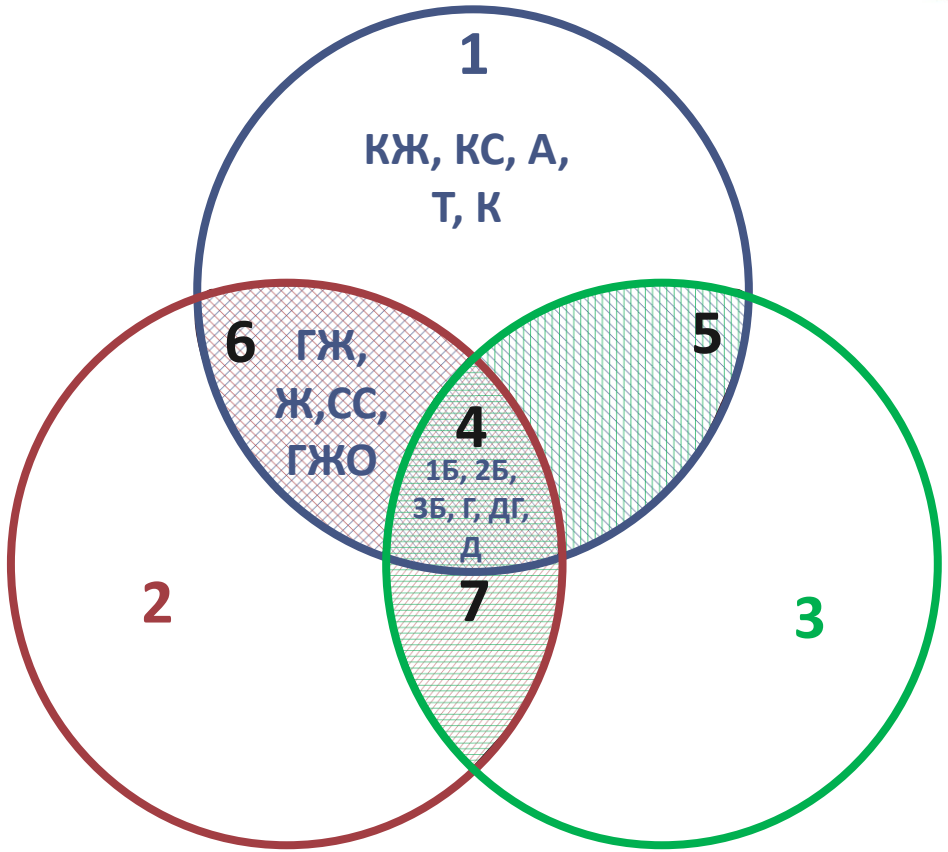
Сернистость используется как дополнительный критерий, при этом сернистые и высокосернистые угли предпочтительнее сжигать в ЦКС благодаря возможности внутритопочного связывания SOx при подаче известняка.

Технология исп. угля	Рекомендуемый диапазон характеристик угля				
Характеристика	Выход летучих	Теплота сгорания	Влажность	Зольность	Сернистость
ЦКС	**<12% или >40%**	**<12 МДж/кг**	**>30-40%**	**>40%**	**>2,5% предпочтительно**
Факельное сжигание	**Любая**	**Любая**	**Любая**	**Любая**	**<2,5%**
Газификация угля и последующее сжигание генераторного газа	**>30%**	**>12 МДж/кг**	**<40%**	**<20-30%**	

Качественная оценка целесообразности применения технологий энергетического использования углей по маркам

Условные обозначения областей

1 – Пригодны для факельного сжигания;
2 – Пригодны для сжигания в ЦКС;
3 – Пригодны для газификации;
4 – Пригодны для всех технологий;
5 – Пригодны для газификации и факельного сжигания;
6 – Пригодные для факельного сжигания и сжигания в ЦКС;
7 – Пригодны для сжигания в ЦКС и газификации.

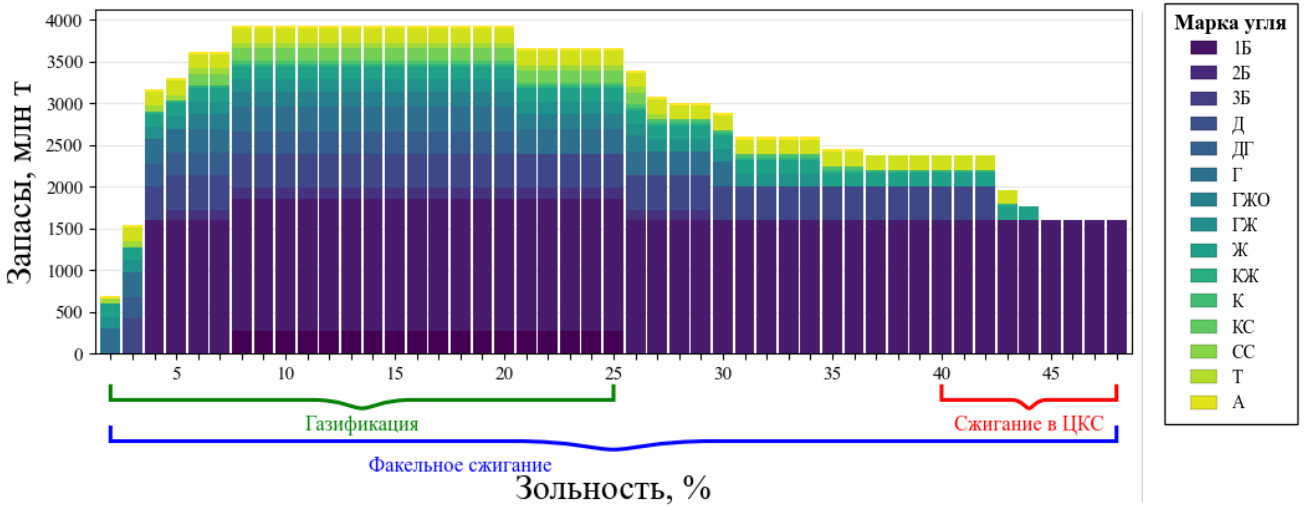


Из 34 основных марок угля, представленных в ДФО и СФО, были отобраны 15 марок, наиболее широко применяемых в энергетике

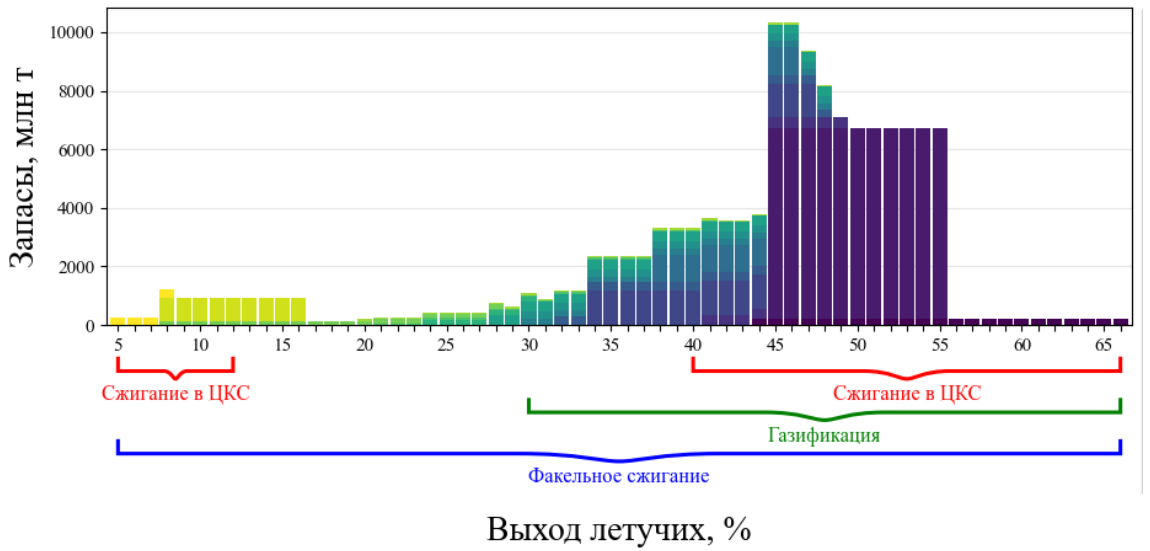
Качественный анализ 15 основных марок угля СФО и ДФО показывает, что значительная часть ресурсной базы может быть использована в нескольких технологических схемах. Марки 1Б, 2Б, 3Б, Г и ДГ соответствуют критериям факельного сжигания, ЦКС и газификации; большинство остальных марок – критериям двух технологий.

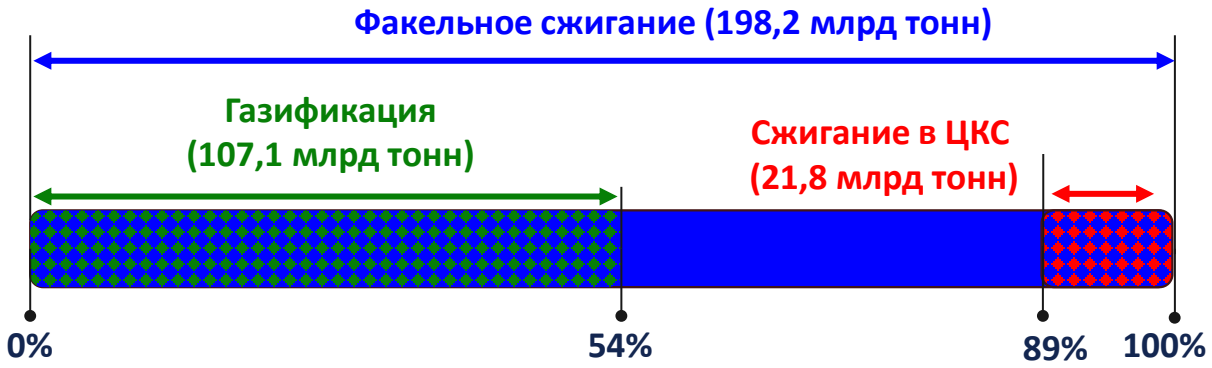
Количественная оценка целесообразности применения технологий энергетического использования углей СФО

Распределение балансовых запасов угля СФО по марками и зольности



Распределение балансовых запасов угля СФО по маркам и выходу летучих





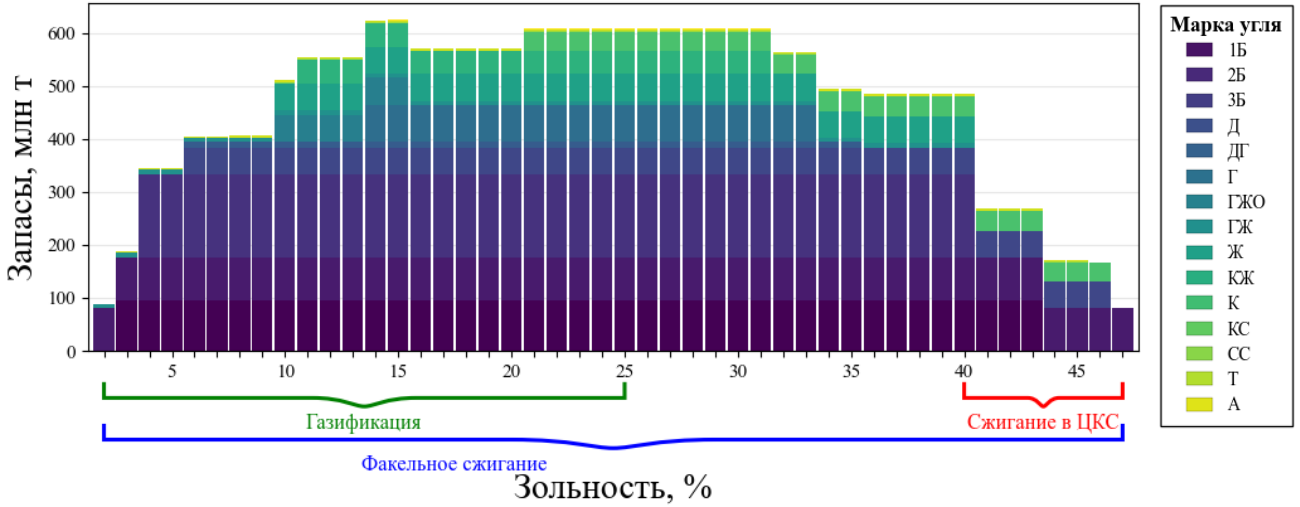
Процентная доля от балансовых запасов угля СФО, %

По результатам совместной оценки предложенных критериев **100%** балансовых запасов СФО соответствуют условиям **факельного сжигания**. Внутри этой области **54%** запасов одновременно удовлетворяют требованиям **газификации**, а **11%** ресурсной базы, представленные главным образом высокозольными, высокосернистыми и низкокалорийными углями, целесообразно ориентировать на сжигание в **ЦКС**.

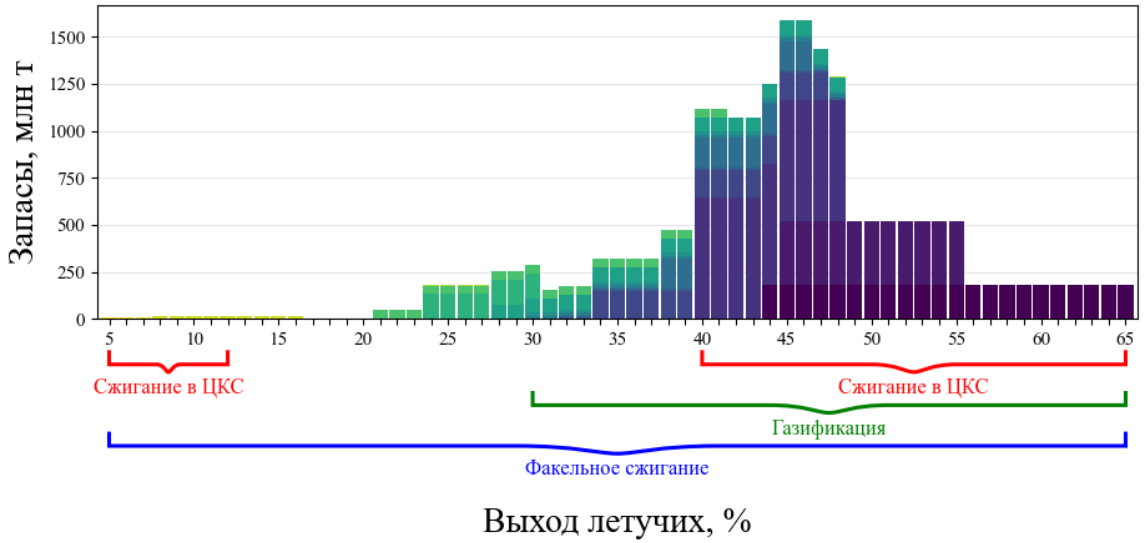
Для пересекающихся областей **факельного сжигания** и **газификации** определяющим фактором выбора становится уже технико-экономическое сравнение технологий.

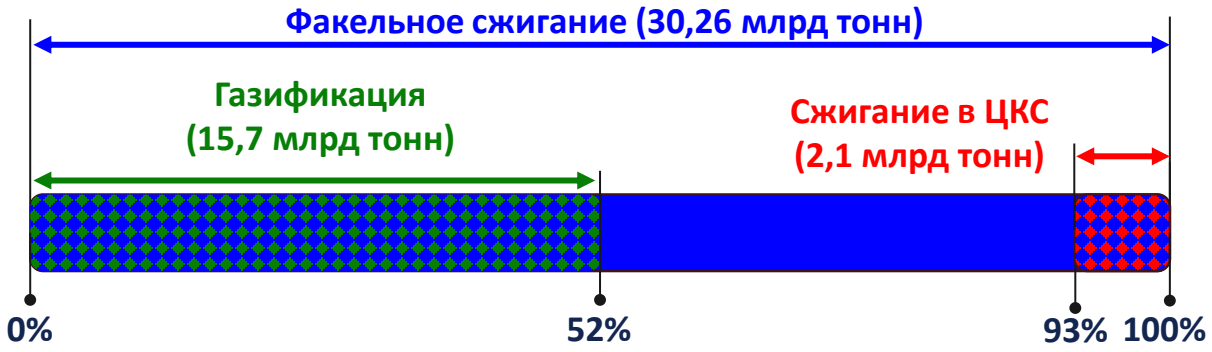
Количественная оценка целесообразности применения технологий энергетического использования углей ДФО

Распределение балансовых запасов угля ДФО по марками и зольности



Распределение балансовых запасов угля ДФО по маркам и выходу летучих





Процентная доля от балансовых запасов угля ДФО, %

Для ДФО получена следующая структура распределения ресурсной базы: **100%** балансовых запасов соответствуют условиям **факельного сжигания**, причем **52%** одновременно входят в область применимости **газификации**, а порядка **7%** соответствуют принятым критериям для применения в технологиях **ЦКС**. При этом выбор между **газификацией** и **факельным сжиганием** все также зависит от технико-экономических показателей установки, на которой планируется применение угольного топлива.

Выводы по анализу ресурсной базы углей и применимости технологий энергетического использования углей СФО и ДФО

1) **СФО и ДФО формируют основную угольную ресурсную базу России – около 91,3% балансовых запасов страны.** Значительный масштаб и неоднородность распределения ресурсной базы определяют необходимость выбора технологий энергетического использования с учетом характеристик конкретных углей.

2) **На СФО приходится около 78,2% балансовых запасов угля России.** В структуре запасов округа преобладают бурые и каменные угли – около 56% и 43% соответственно, при этом значительные различия их качественных характеристик формируют различные области рационального применения технологий.

3) **На ДФО приходится около 13,1% балансовых запасов угля России.** Структура ресурсной базы близка к СФО: около 55% запасов составляют бурые и около 45% – каменные угли, что также требует дифференцированного выбора технологии их энергетического использования.

4) **Наиболее широкий охват ресурсной базы угля пригоден для факельного сжигания.** Значительная часть этих же углей одновременно пригодна для газификации, тогда как ЦКС целесообразно ориентировать преимущественно на угли со сложными качественными характеристиками, неблагоприятными для традиционного факельного сжигания. Окончательный выбор технологии должен определяться свойствами конкретного топлива и технико-экономическими показателями проекта.

Оценка необходимости и требуемой эффективности систем газоочистки для основных марок углей СФО и ДФО

Постановка задач исследования по разработке рекомендаций по применению систем газоочистки для различных углей

Рассмотрено 189 месторождений Сибирского и Дальневосточного федеральных округов

Ход анализа

1 Исходные данные

Формирование базы данных с составом углей по месторождениям.

2 Расчет выбросов

Расчет выбросов золы, SOx, топливные NOx. Расчет по ИТС 38.

3 Нормативы

Рассматривались нормативы:
- до 31.12.2000;
- 01.01.2001-31.12.2025;
- с 01.01.2026.

4 Требуемая степень очистки

Для всех рассматриваемых углей рассчитывалась требуемая степень очистки по трем нормативам.

5 Формирование рекомендаций

Даны рекомендации по золоулавливанию, сероочистке и по методам подавления оксидов азота.

Охват исследования

Рассмотрено 90% всех добываемых углей в Российской Федерации и широкая номенклатура марок углей.

Методика расчета выбросов и требуемой эффективности газоочистки

Оксиды азота

1 Исходные параметры топлива и процесса
Содержание азота N, %
Параметры топочного процесса (температура, избыток воздуха и др.)

2 Расчет концентрации NO_x
Определение выбросов топливных оксидов No_x с учетом коэффициента ξ_{NOx}

$$C_{NOx} = \frac{\xi_{NOx} \cdot N \cdot 10^4}{Q_i \cdot V_г} \text{ мг/м}^3$$

ξ_{NOx} – f(свойства топлива, парамерты топочноо процеса)

3 Расчет ξ_{NOx}

$$\xi_{NOx} = FR^{0,6} + (1 + N^d)$$

FR – топливный коэффициент, равный отношению связанного углерода к выходу летучих на рабочую массу; N^d – содержание азота в сухой массе топлива, %.

4 Сопоставление с нормативом
$C_{расч} \leftrightarrow C_{норм}$ (по ИТС 38)

5 Определение требуемого уровня очистки
Расчет $\eta_{треб}$ для NO_x

Для углей с высоким выходом летучих веществ температура в топке составляет менее 1500°C из-за этого в работе рассматриваются топливные оксиды азота.

Оксиды серы

1 Исходные параметры топлива
Содержание серы S, %
низшая теплота сгорания Qi, МДж/кг

2 Расчет концентрации SO_x
Определение выбросов SO_2 (в пересчете на So_x) по характеристикам топлива

$$C_{SOx} = \frac{2 \cdot S \cdot 10^4}{Q_i \cdot V_г} \text{ мг/м}^3$$

$V_г$ – объем сухих дымовых газов, м³/кг

3 Сопоставление с нормативом
$C_{расч} \leftrightarrow C_{норм}$ (по ИТС 38)

4 Определение требуемого уровня очистки
Расчет $\eta_{треб}$ для SO_x

Зола

1 Исходные параметры топлива
Зольность A, %
низшая теплота сгорания Qi, МДж/кг

2 Расчет концентрации золы
Определение выбросов твердых частиц по характеристикам топлива

$$C_{золы} = \frac{A \cdot 10^4}{Q_i \cdot V_г} \text{ мг/м}^3$$

$V_г = V_0 \cdot \alpha$, где V_0 – теор. объем газов, м³/кг
α – коэффициент избытка окислителя

3 Сопоставление с нормативом
$C_{расч} \leftrightarrow C_{норм}$ (по ИТС 38)

4 Определение требуемого уровня очистки
Расчет $\eta_{треб}$ для золы

Общая формула определения требуемой эффективности очистки

$$\eta_{треб} = 1 - \frac{C_{ном}}{C_{расчет}} \text{ при } C_{расчет} > C_{ном}$$

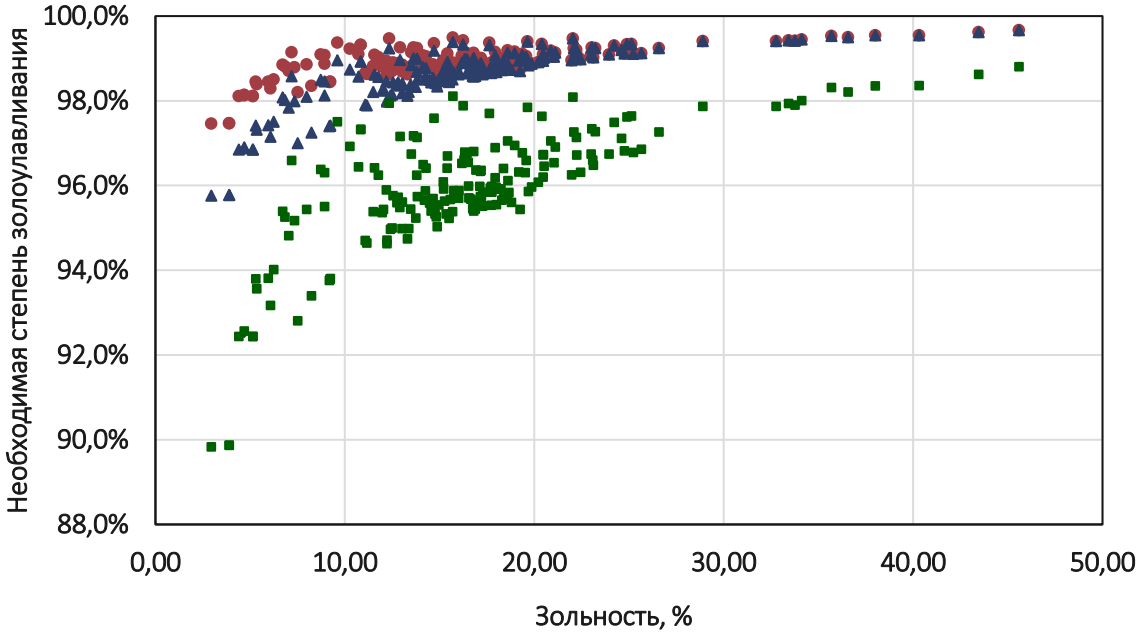
Результат расчета

1. необходимый уровень снижения NO_x
2. требуемая степень сероочистки
3. требуемая степень золоулавливания

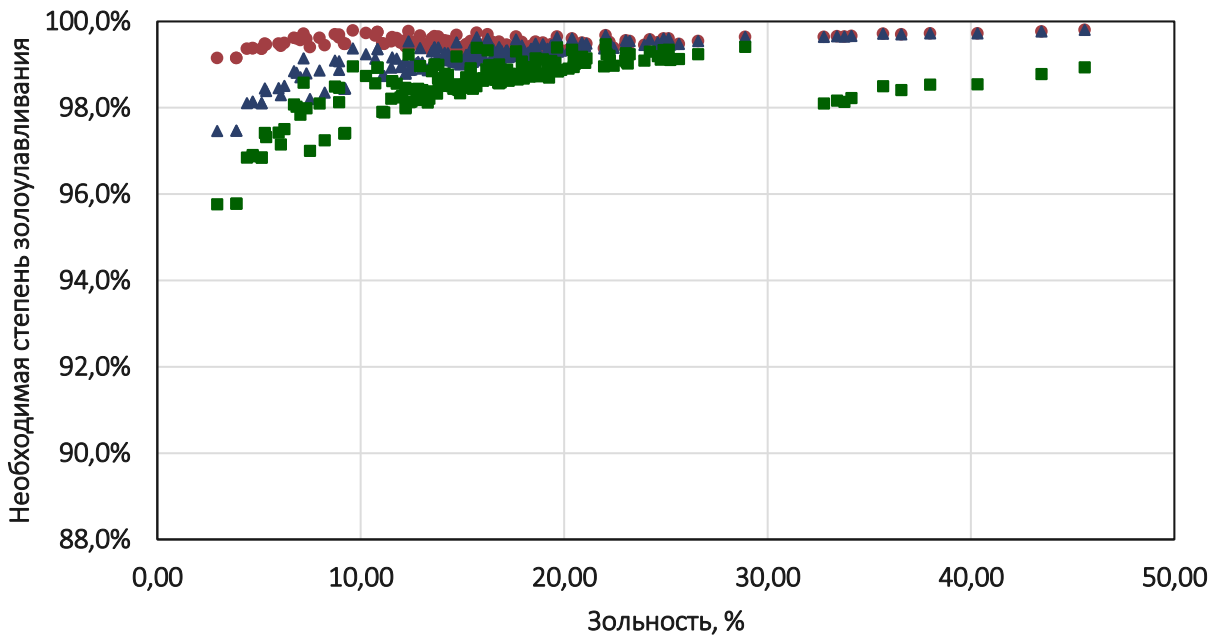
Требуемая степень золоулавливания

Год ввода котла ■ до 31.12.2000 ▲ 01.01.2001 – 31.12.2025 ● С 01.01.2026

МЕНЕЕ 300 МВт тепловой мощности



БОЛЕЕ 300 МВт тепловой мощности



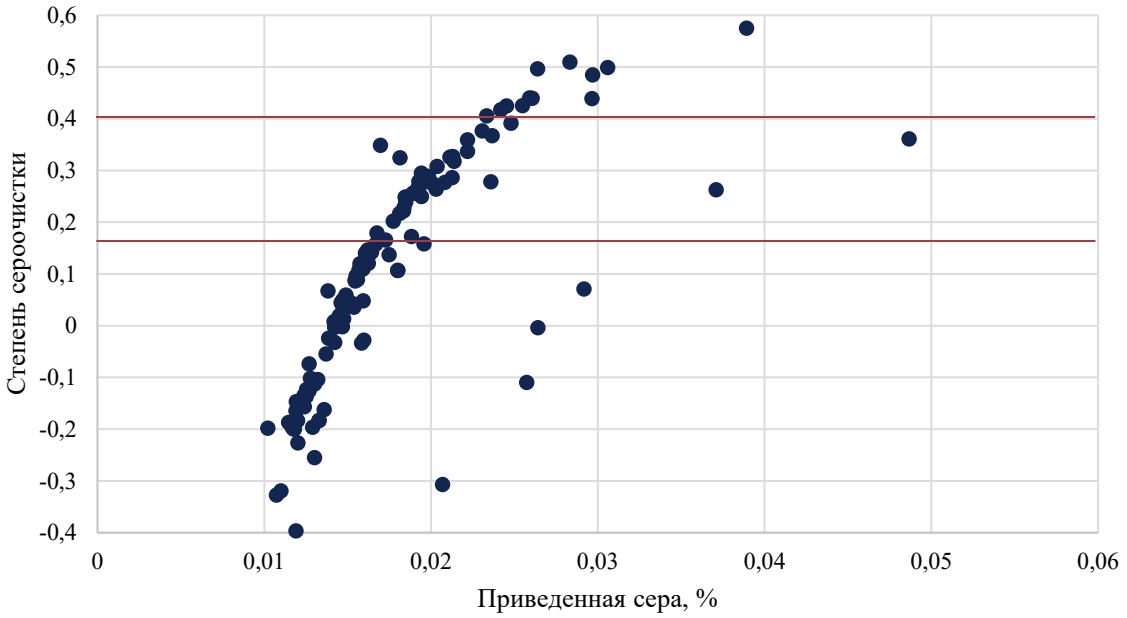
98 -99,5%
по нормативам 2026 года

до 99,8%
по нормативам 2026 года

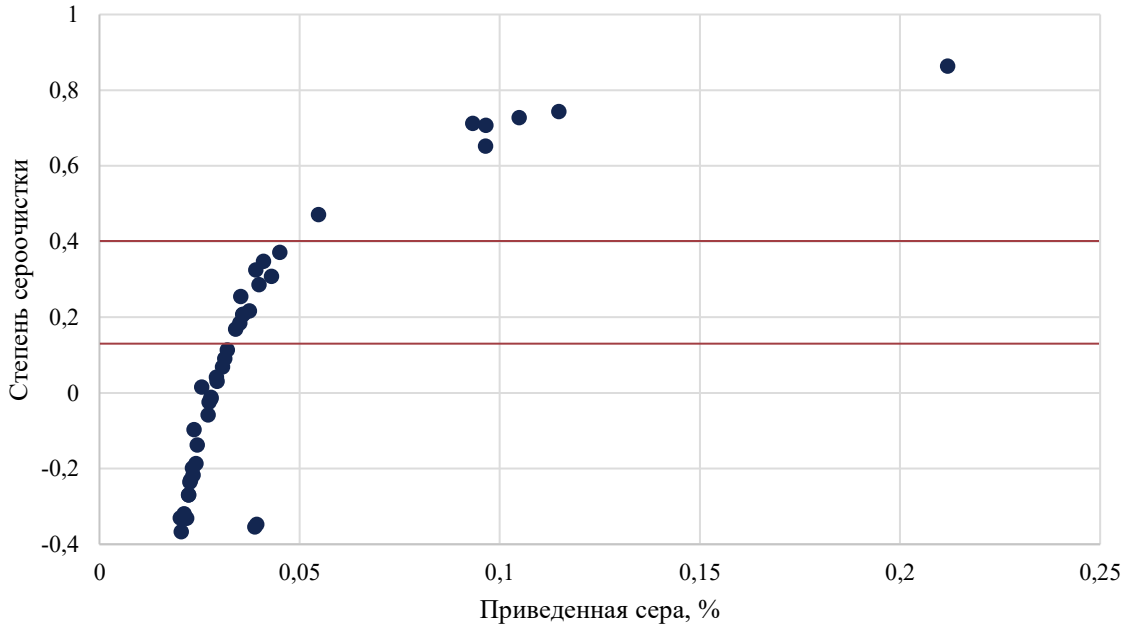
Требуемая степень сероочистки

Расчет для углей с разным содержанием серы в рабочей массе

$S^r \leq 0,5\%$



$S^r > 0,5\%$



ОРИЕНТИРЫ ВЫБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РАСЧЕТНОЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ η

$\eta \leq 0$
Сероочистка не требуется

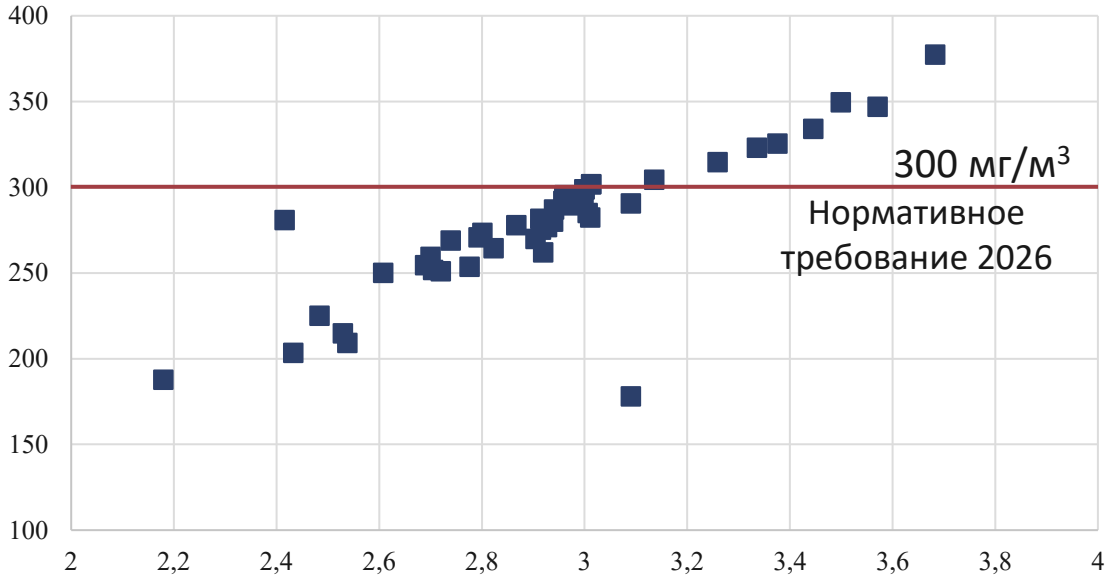
$0 < \eta < 0,15$
Смешивание и обогащение угля

$0,15 < \eta < 0,40$
Упрощенные мокросухие методы

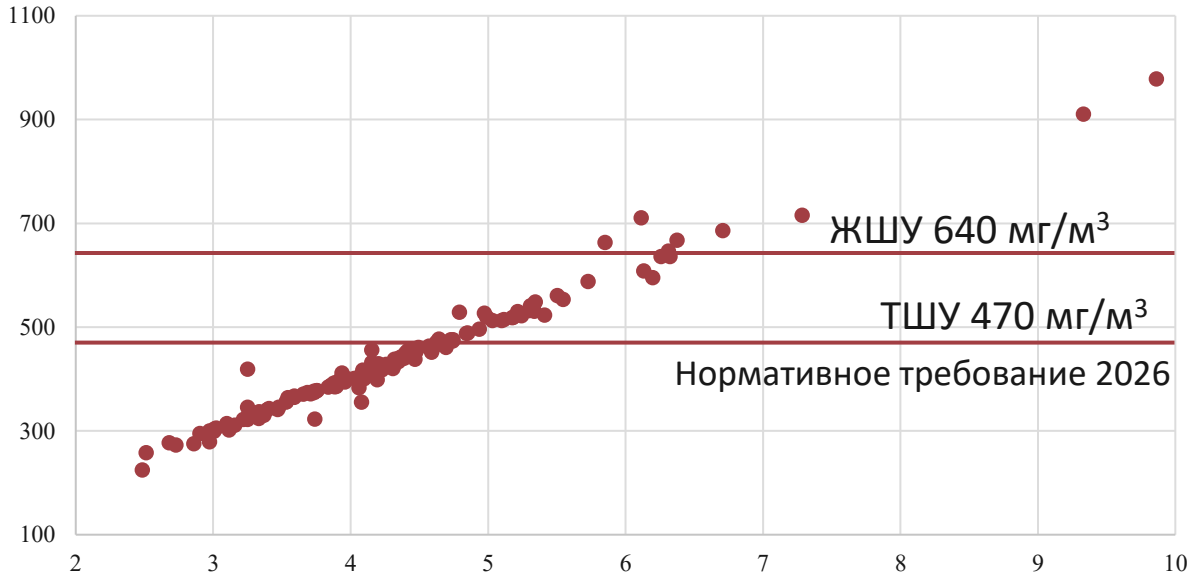
$\eta > 0,40$
Мокрая известняковая сероочистка, NID технология

Оценка необходимости снижения выбросов NO_x при сжигании бурых и каменных углей СФО и ДФО

Бурые угли



Каменные угли



ОЦЕНКА ВЫПОЛНЕНИЯ НОРМАТИВОВ 2026 ГОДА

НОРМАТИВЫ

Бурые угли
300 мг/м³

Каменные угли
470–640 мг/м³

Бурые угли

При сжигании бурых углей норматив по NO_x (300 мг/м³) превышается только для марки 3Б при безразмерном коэффициенте выше 3; концентрация растет с увеличением коэффициента. Рециркуляция 15% дымовых газов смещает порог до 3,25 и сокращает число превышений до шести, но может снизить экономичность и надёжность котлов.

Каменные угли

При сжигании каменных углей необходимо обеспечивать концентрацию оксидов азота в дымовых газах не более 470 мг/м³. Указанному нормативу соответствуют каменные угли, для которых значение безразмерного коэффициента составляет менее 4,6. К углям, не обеспечивающим выполнение данного требования, относятся марки СС и Т.

Итоговые рекомендации по выбору систем газоочистки будущих станций для углей СФО и ДФО

Характеристики угля → Расчет выбросов → Норматив → Требуемая эффективность → Технология

Загрязняющее вещество	Определяющий фактор	Результат расчета	Рекомендуемое решение
	Зольность, мощность котла	Требуемая степень золоулавливания до ~ 99,5-99,8%	Высокоэффективные системы золоулавливания: - Двухступенчатая сухая золоочистка; - Электрофильтры; - Рукавные фильтры (при условии разработки отечественных материалов соответствующего качества); - Химическое кондиционирование.
	Сернистость топлива	Для значительной части углей очистка не требуется; Для оставшихся чаще требуется умеренная степень очистки. Актуально к введению на новых угольных энергоблоках.	Выбор технологии определяется сернистостью угля: - Аммиачно-сульфатная сероочистка; - Мокро-сухая сероочистка NID; - Мокрая известняковая очистка.
	Свойства топлива и топочный процесс	Для большинства каменных углей достаточно первичных мероприятий; для части бурых углей требуется более глубокая очистка.	Первичные или первичные + вторичные методы: -Технология СКВ.

Переход к нормативам 2026 г. прежде всего усиливает требования к золоулавливанию и снижению NO_x; по SO_x ситуация остается благоприятной.

Выводы по требованиям к системам газоочистки новых угольных энергоблоков СФО и ДФО

1) Применение полномасштабных систем сероочистки необходимо только при использовании 19 марок угля на котлах, введенных в эксплуатацию после 2001 года. При использовании углей 51 месторождения можно ограничиться упрощенными методами сероочистки. Во всех остальных случаях системы сероочистки либо не требуются, либо необходимое снижение выбросов может быть обеспечено подмешиванием низкосернистого угля.

2) Согласно современным нормативным требованиям для энергетических котлов, введенных в эксплуатацию с 2026 года, при сжигании большинства рассмотренных марок угля нормативные показатели по выбросам оксидов азота могут быть обеспечены режимно-технологическими методами их подавления. Исключение составляют угли марок 3Б, СС и Т, для которых может потребоваться применение дополнительных методов снижения выбросов NO_x.

3) Для систем золоулавливания как на действующих, так и на вновь вводимых энергетических котлах рекомендуется применение высокоэффективных электрофильтров или рукавных фильтров, при условии разработки отечественных материалов соответствующего качества.