

Технологическое развитие отраслей ТЭК для достижения углеродной
нейтральности экономики России



Анализ энергетических показателей энергоустановок на основе CO₂ цикла различной архитектуры

Садкин Иван Сергеевич

*м.н.с. УНЛ «Теплоэнергетика», аспирант НГТУ
инж.-исслед. ИТ СО РАН*

Щинников Павел Александрович

д.т.н., профессор, в.н.с УНЛ «Теплоэнергетика» НГТУ

Москва, ИНЭИ, 2023

Новосибирский
государственный
технический
университет

Климатическая повестка



Международные соглашения

Декарбонизация

Квоты, пошлины, санкции

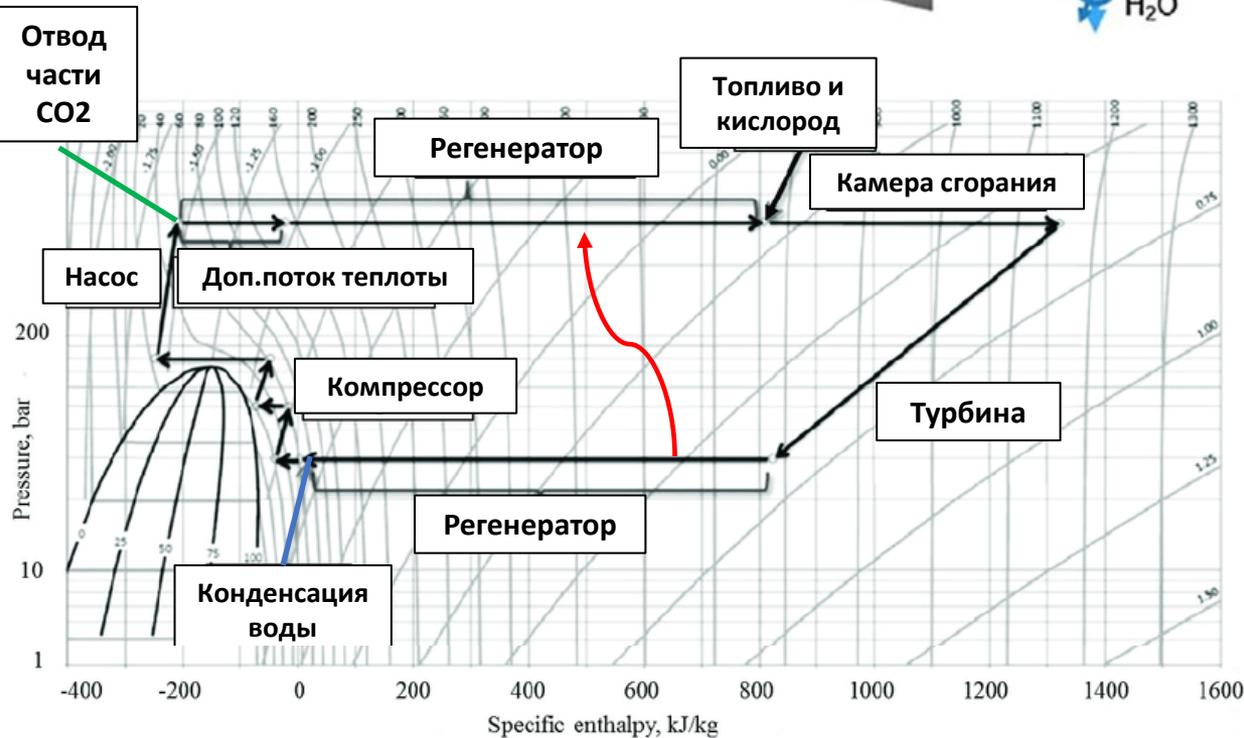
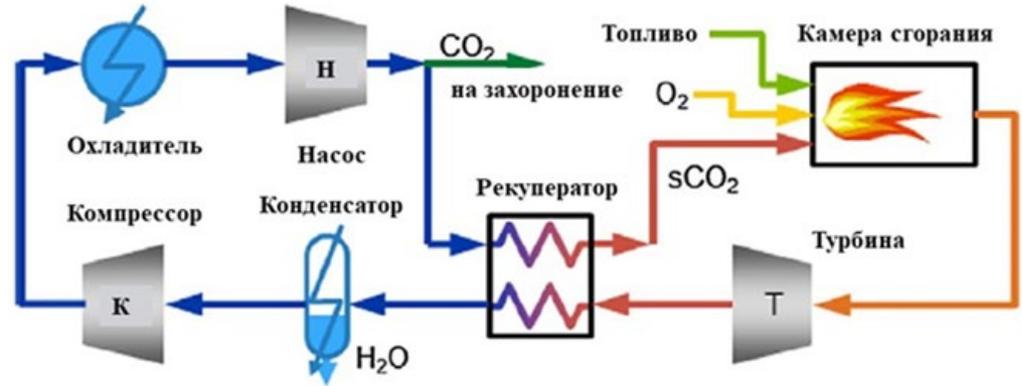


Развитие инструментов
экономического принуждения

Направления развития энергетики

Кислородно-топливный энергетический цикл на углекислом газе

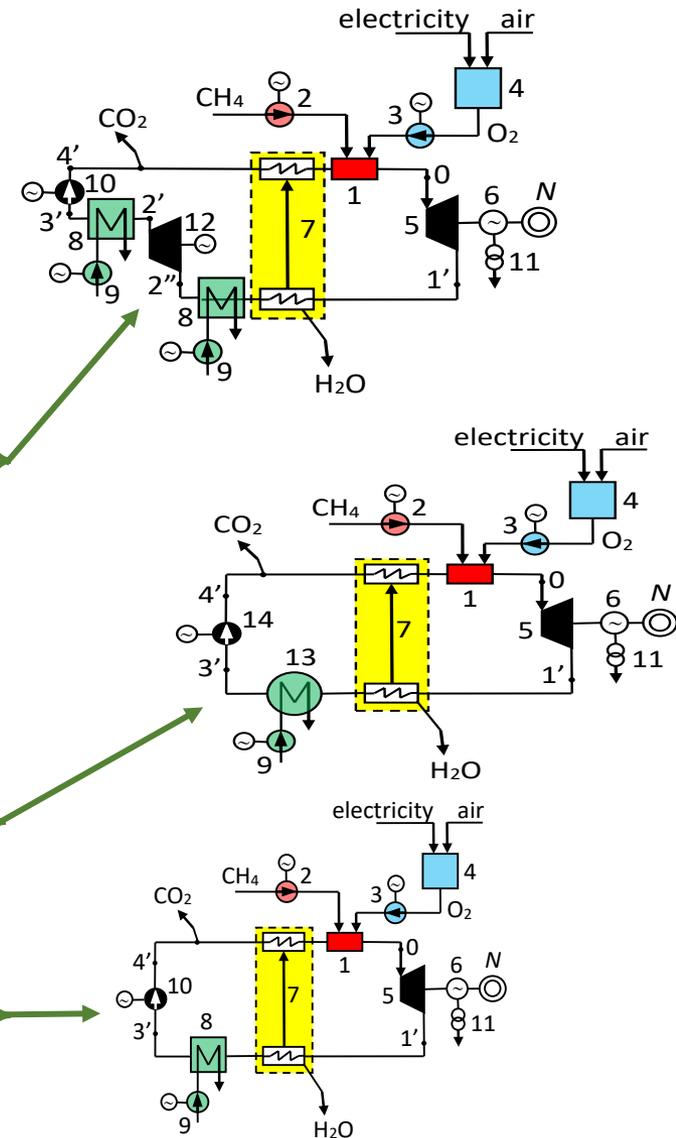
Технологическая схема



Термодинамический цикл

Кто занимается в мире?

Название цикла или ближайшая конфигурация	Компания	Страна	Особенности технологической схемы
Аллама	Национальная лаборатория энергетических технологий (NETL)	США	Без конденсации, вне зоны насыщения, с компрессором и насосом
Аллама	Институт энергетических исследований (EPRI)	США	
Аллама	Net Power Ltd	США	
Аллама	МЭИ	Россия	
Allam-Z	Юго-Восточный университет, г.Нанкин	Китай	С конденсацией рабочего тела и использованием насоса
ОИВТ / Allam-Z	ОИВТ РАН	Россия	
НГТУ	НГТУ НЭТИ	Россия	Полностью в сверхкритической зоне, с применением насоса, без конденсации



Проблема

- Исчерпывающая теория CO₂ циклов или циклов с нулевыми выбросами в мировой энергетике пока не выработана. Ее создание затруднено отсутствием практической реализации технических решений.
- Работы научных групп связаны с различными технологическими схемами, составом оборудования и его параметрами, что затрудняет обобщающие исследования.

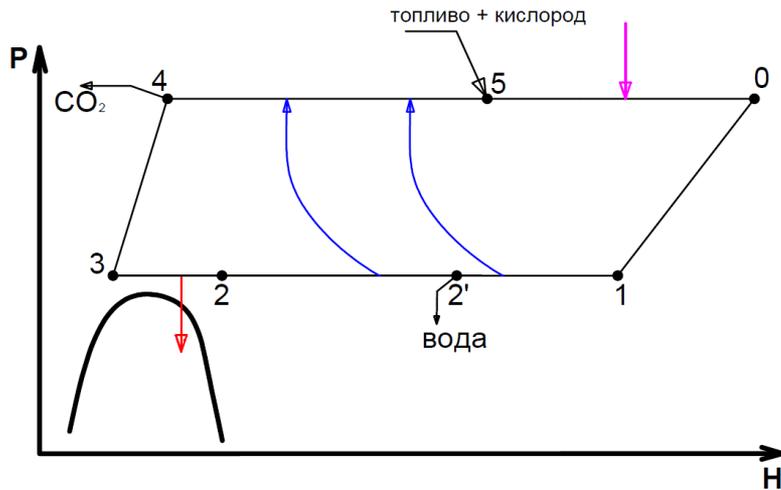
Цель

- Установление влияния термодинамических параметров различных вариантов CO₂ циклов на их энергетические и экологические характеристики.

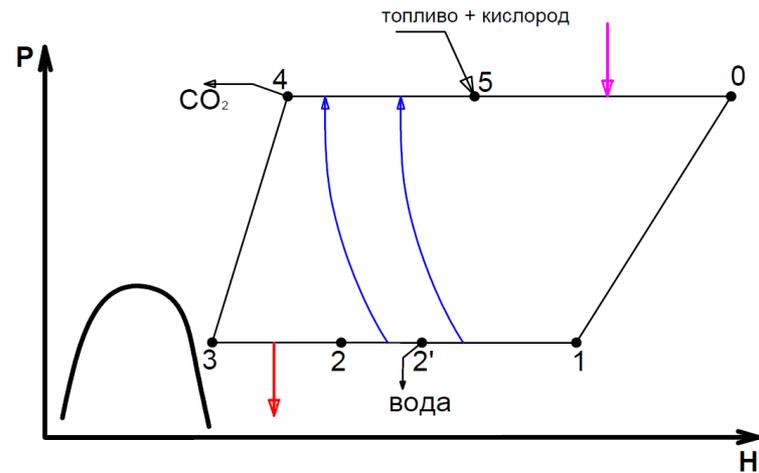
Ключевая задача

- Сравнить CO₂ циклы различной архитектуры между собой и с другими известными технологиями генерации электроэнергии.

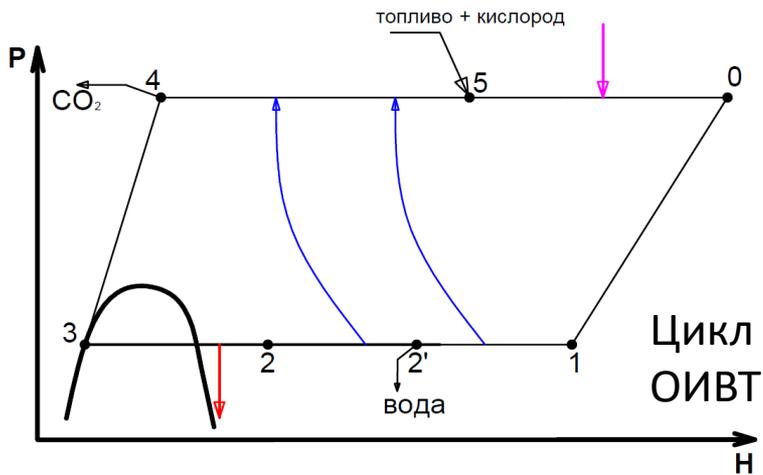
Исследуемые циклы на углекислом газе



Цикл в сверхкритической области с использованием насоса

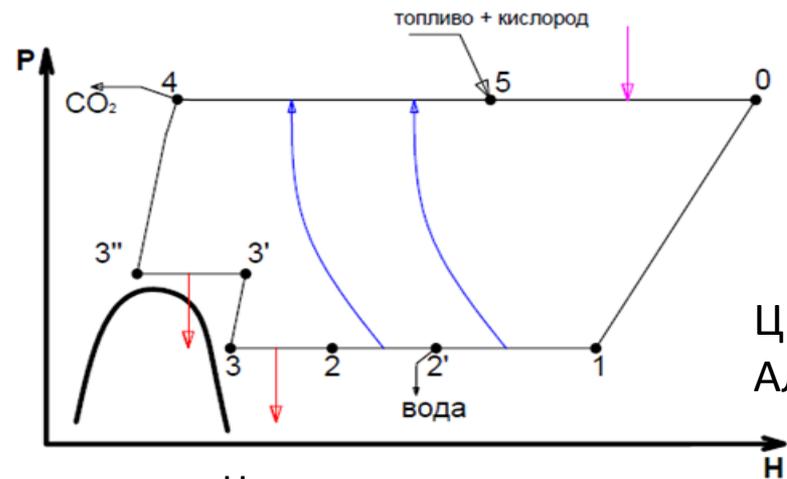


Цикл с компрессорным сжатием



Цикл ОИВТ

Цикл с конденсацией



Цикл Аллама

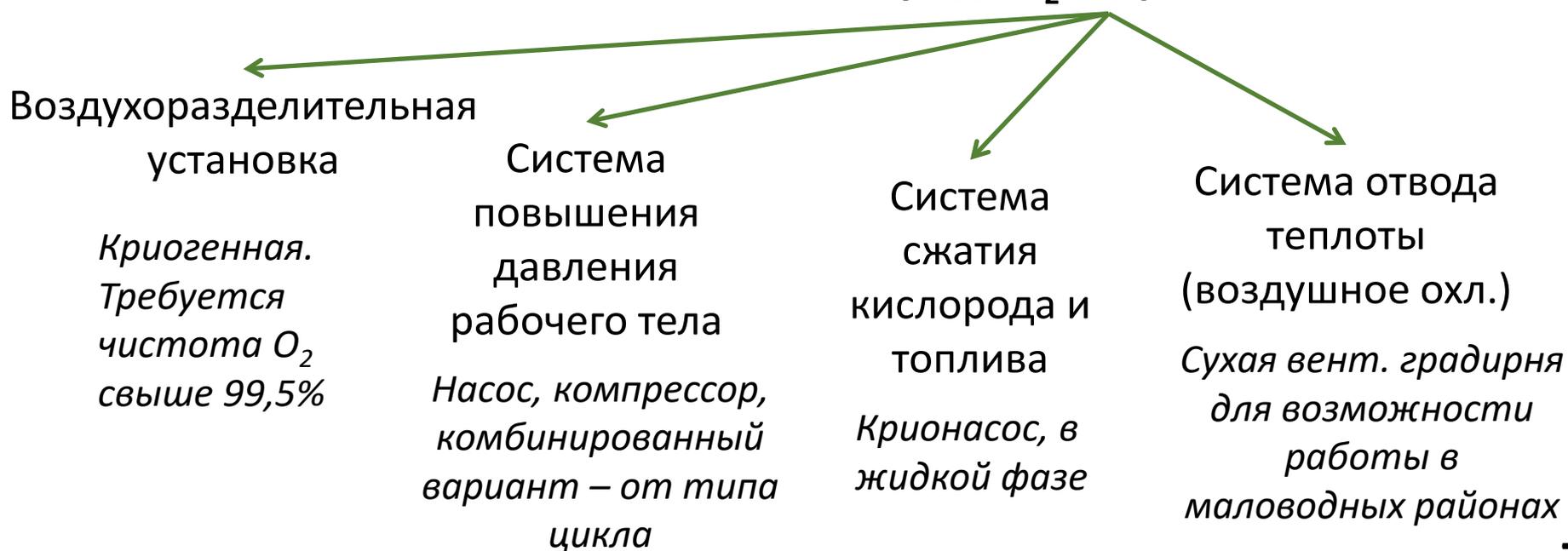
Цикл с двухступенчатым сжатием в компрессоре и насосе

Определение эффективности выработки и отпуска электроэнергии

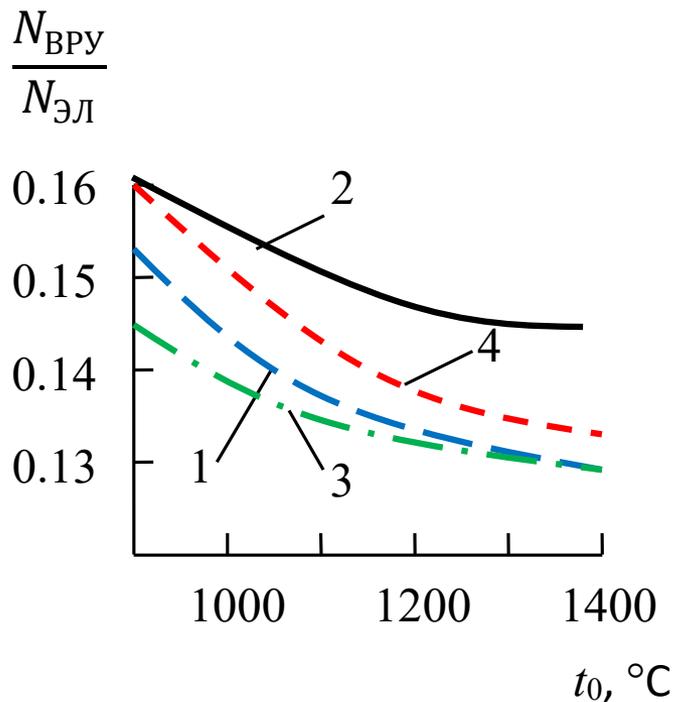
$$\text{КПД}_{\text{брутто}} = \eta_t \cdot \eta_{\text{КС}} \cdot \eta_{\text{Тр.Тепл}} \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{\text{ЭМ}}$$

$$\text{КПД}_{\text{нетто}} = \text{КПД}_{\text{брутто}} \cdot (1 - K_{\text{CH}})$$

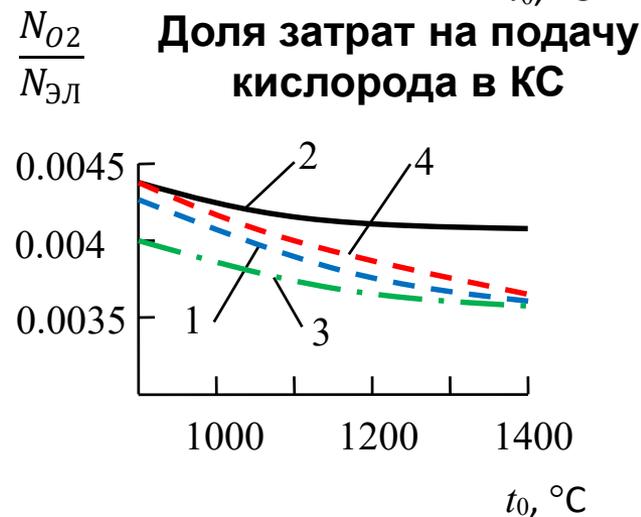
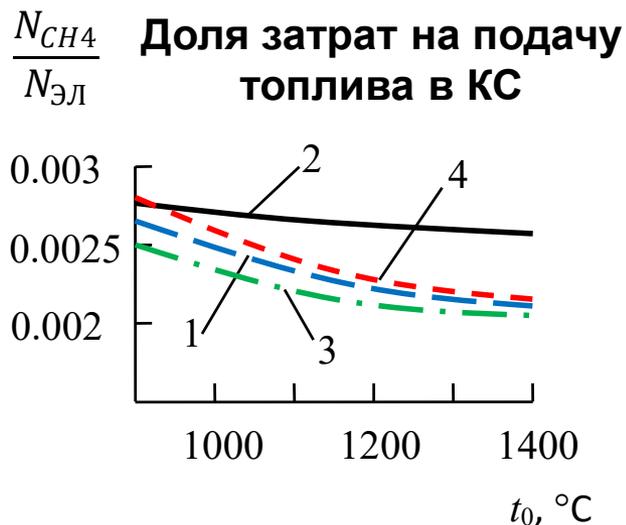
Расчетная структура собственных нужд CO₂ энергоблоков



Анализ энергозатрат на различные системы собственных нужд



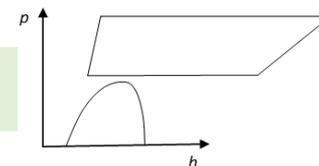
Доля затрат на ВРУ от вырабатываемой эл/эн



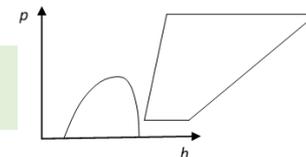
Обозначения:

варианты CO₂ цикла

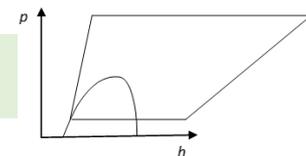
1



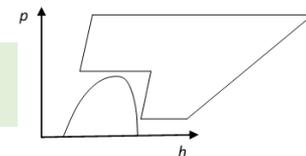
2



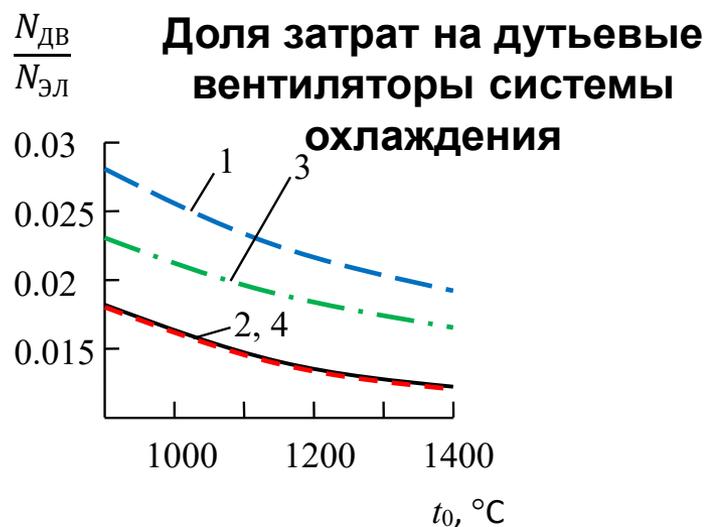
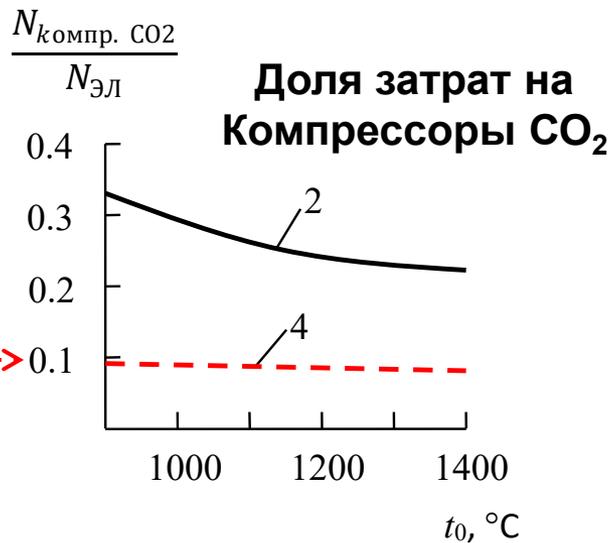
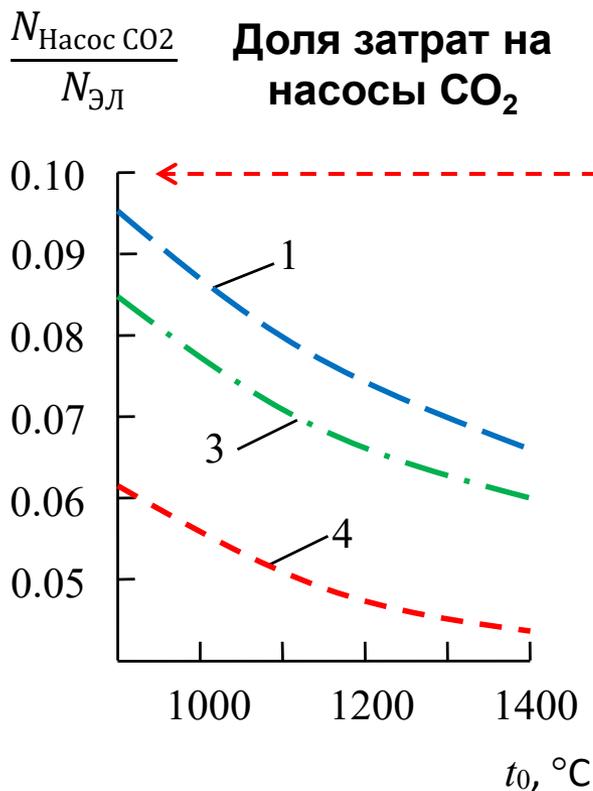
3



4



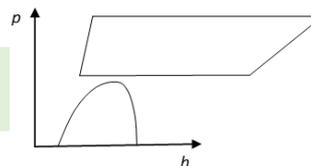
Анализ энергозатрат на различные системы собственных нужд



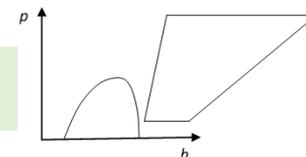
Обозначения:

варианты CO₂ цикла

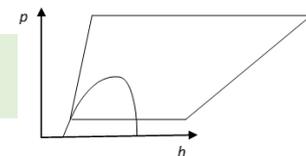
1



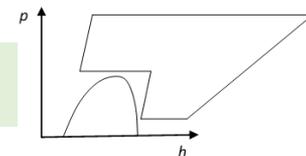
2



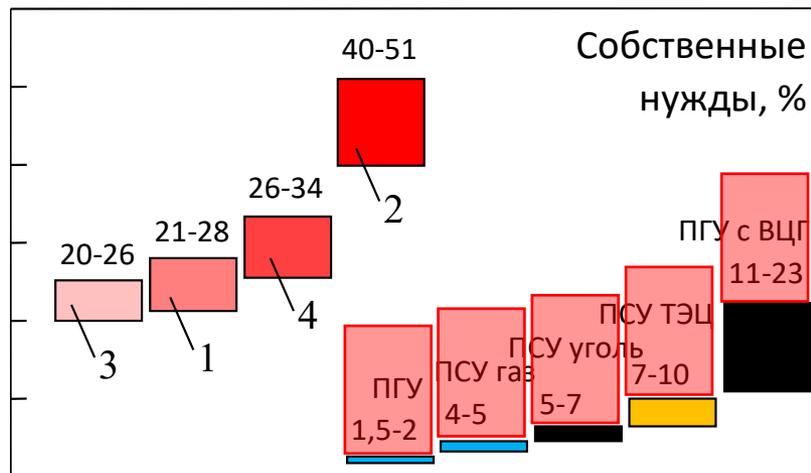
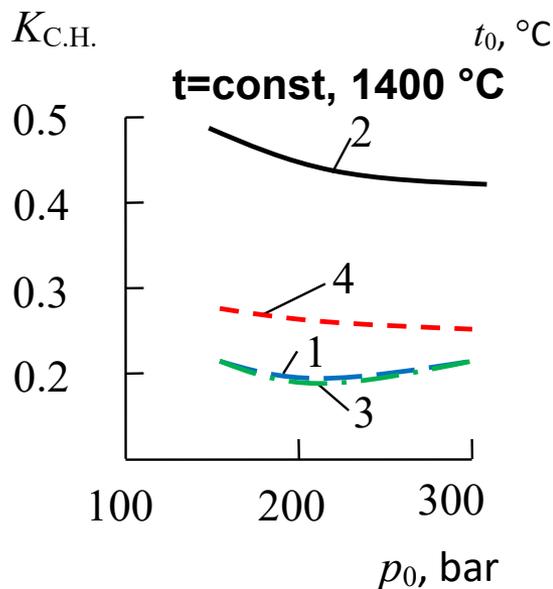
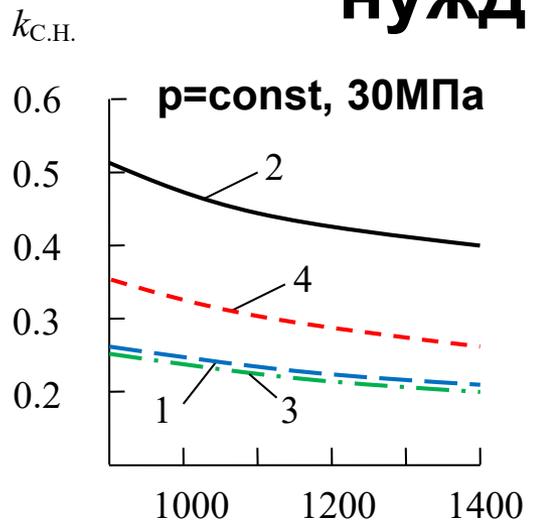
3



4



Зависимость коэффициента собственных нужд от т/д параметров цикла



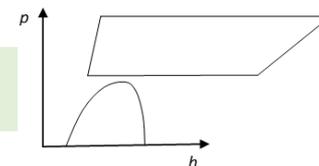
Сравнение с традиционными энергоблоками по величине собственных нужд

Оснащение традиционных энергоблоков системой CCS ведет к росту с.н. на 12-20%

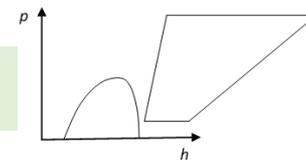
Обозначения:

варианты CO₂ цикла

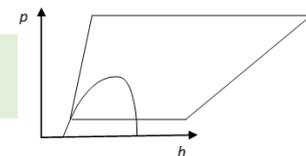
1



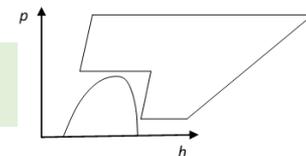
2



3

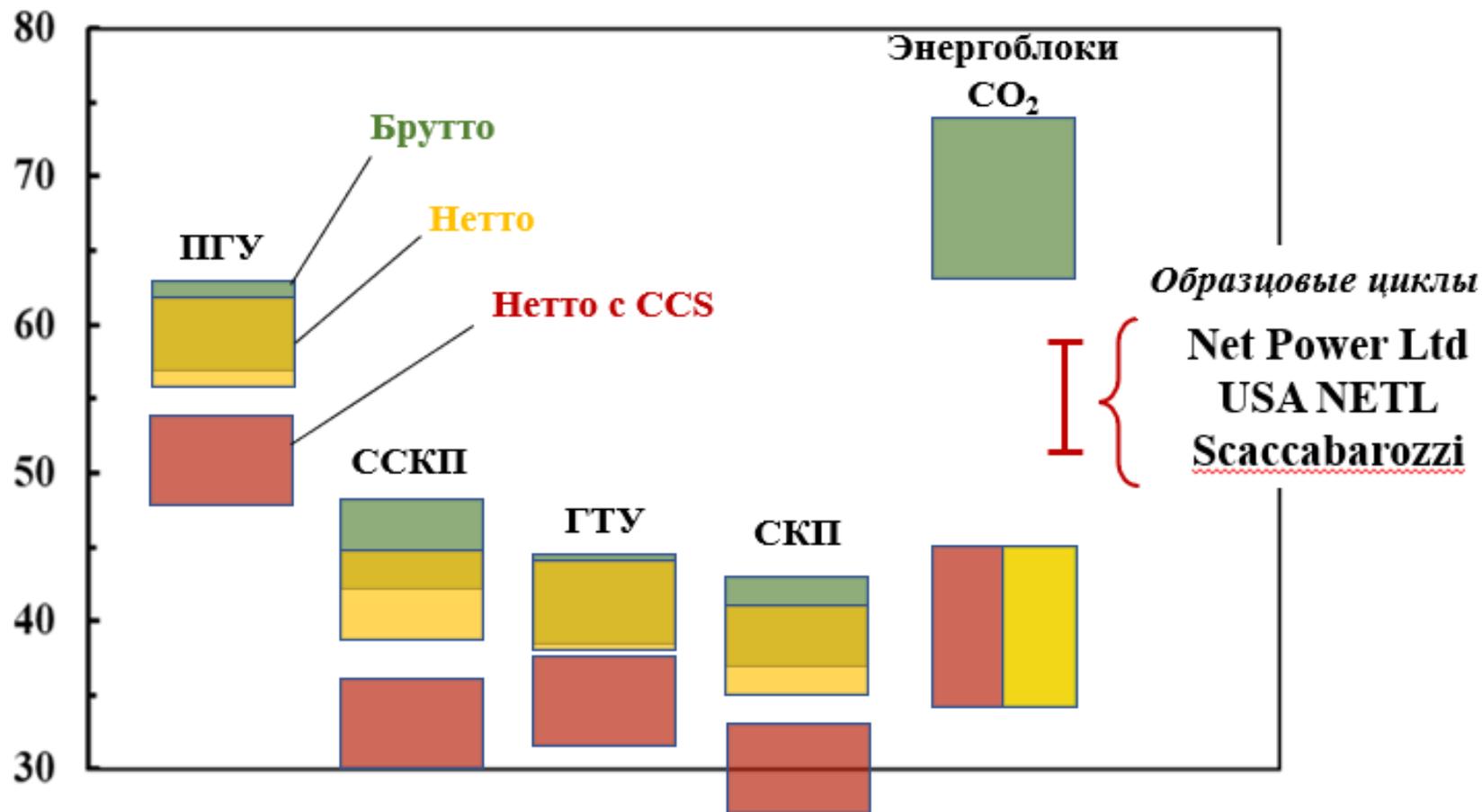


4



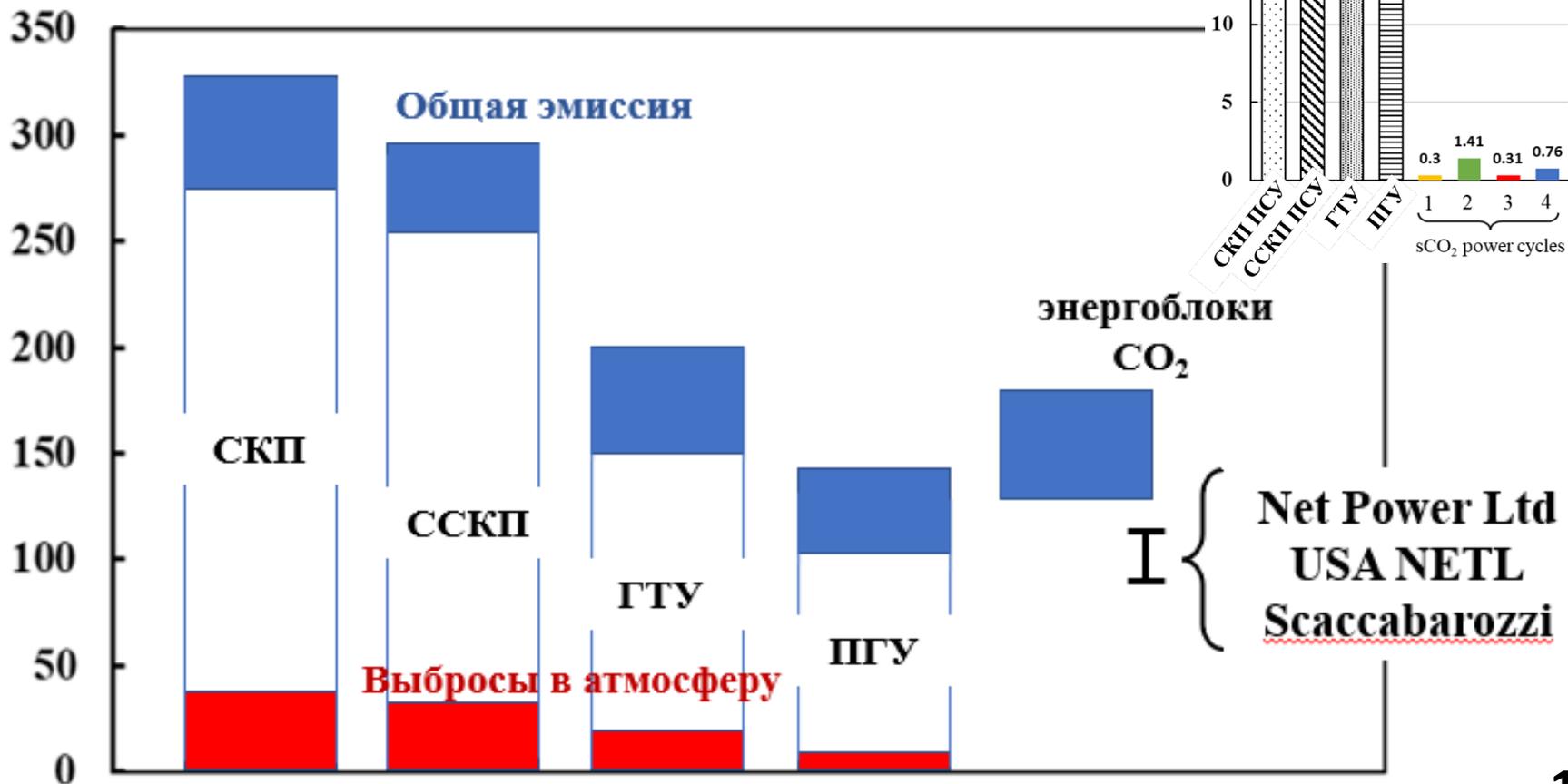
Сравнение различных технических решений с улавливанием выбросов по эффективности производства электроэнергии

КПД, %



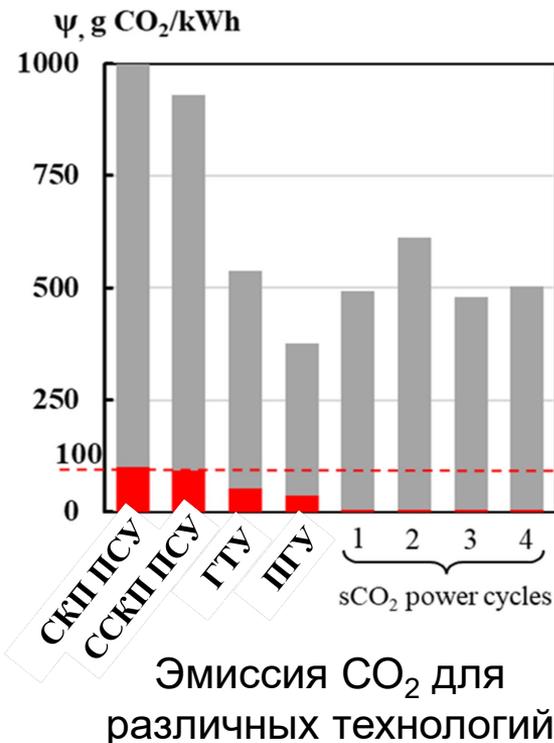
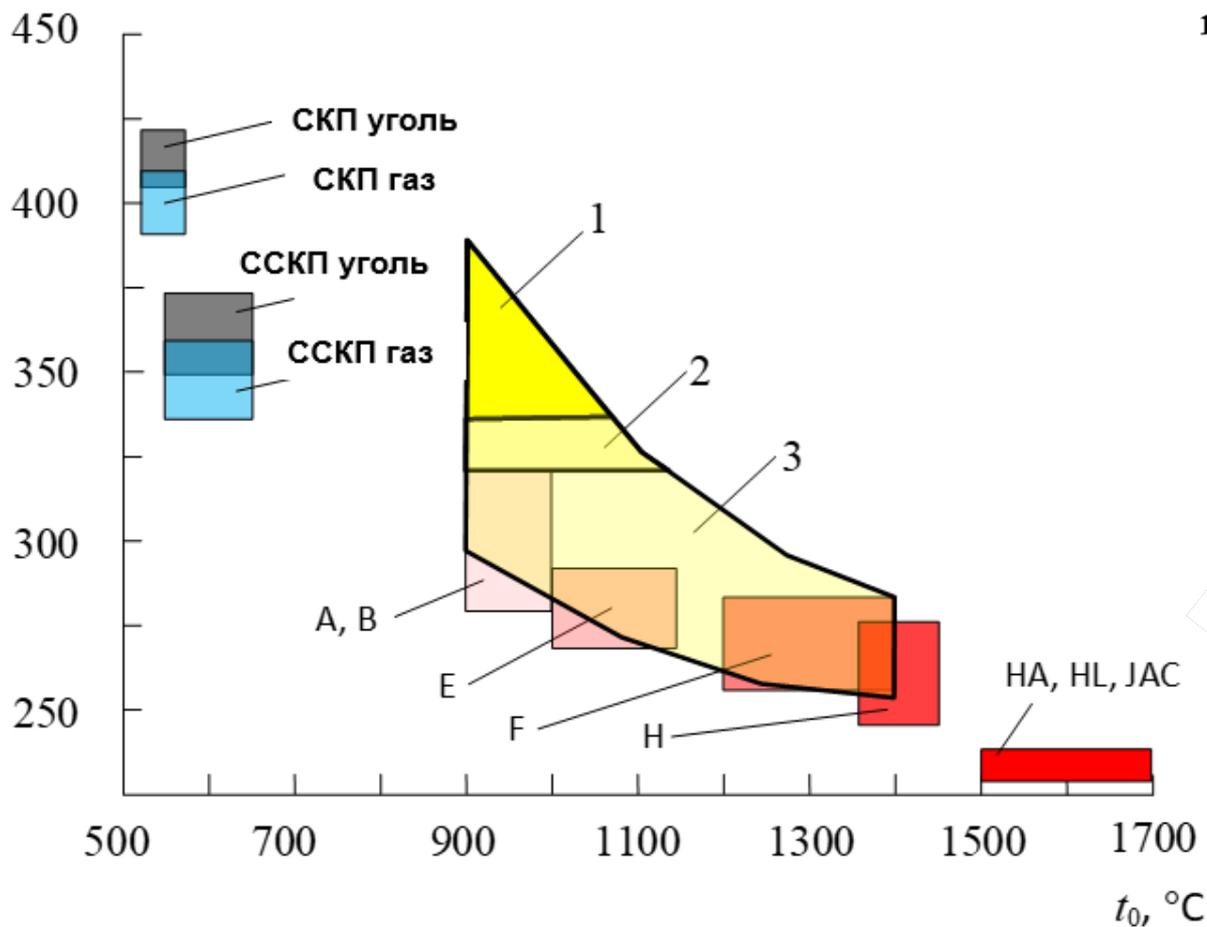
Сравнение различных технических решений с улавливанием выбросов по эмиссии углекислого газа

Эмиссия CO₂, г/МДж



УРУТ энергоблока на основе CO₂ циклов в сравнении с другими технологиями с учетом захвата CO₂

УРУТ, г у.т./кВтч



Заключение

- В базовых конфигурациях CO₂-циклы имеют КПД выработки электроэнергии 65-73% при параметрах на входе в турбину 1150 °С, 30 МПа, превосходя все традиционные энергоблоки.
- Коэффициент собственных нужд CO₂-энергоблоков находится на уровне 22-50% в зависимости от конфигурации и параметров, что делает их менее выгодными по показателю отпуска электроэнергии, чем ПГУ, но предпочтительнее ГТУ, СКП и ССКП с технологиями CCS.
- Основной вклад в собственные нужды составляют затраты электроэнергии на производство кислорода (12.8-16%) от полной мощности установки и на привод компрессоров (от 8-10 до 23-32%)
- По энергетическим показателям варианты установок в бескомпрессорном исполнении выглядят предпочтительнее, чем варианты, где повышение давления обеспечивается при помощи компрессоров.
- Затраты энергии на улавливание и отвод углекислого газа в CO₂ циклах не превышают 1,5%, тогда как в традиционных технологиях затраты на CCS составляют 12-20%.
- Эмиссия углекислого газа для CO₂ циклов составляет 100-140 г/МДж, что выше, чем для ПГУ. Однако технологическая схема CO₂ циклов позволяет улавливать почти 100% углекислоты и отводить ее с давлением до 30 МПа против 90% в установках CCS.

Технологическое развитие отраслей ТЭК для достижения углеродной
нейтральности экономики России



Анализ энергетических показателей энергоустановок на основе CO₂ цикла различной архитектуры

Садкин Иван Сергеевич

*м.н.с. УНЛ «Теплоэнергетика», аспирант НГТУ
инж.-исслед. ИТ СО РАН*

Щинников Павел Александрович

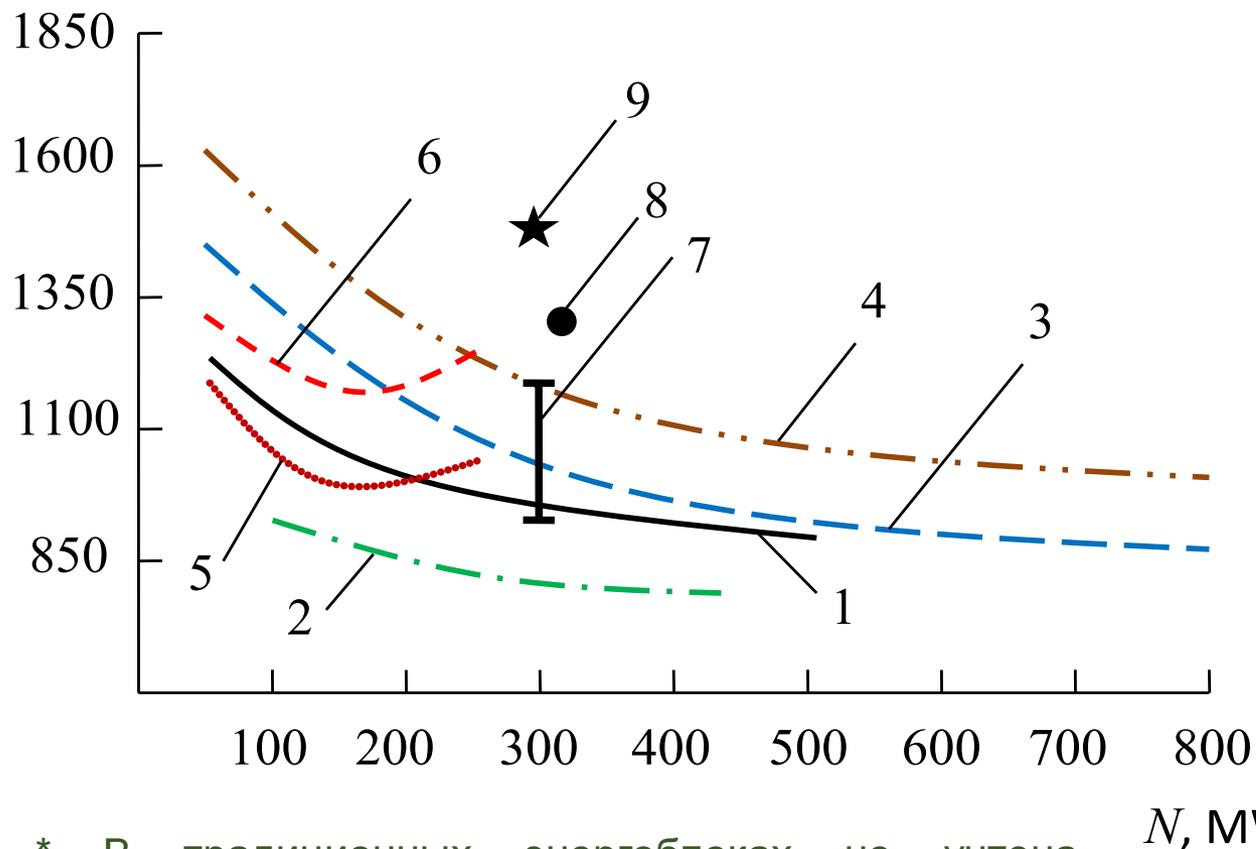
д.т.н., профессор, в.н.с УНЛ «Теплоэнергетика» НГТУ

Москва, ИНЭИ, 2023

Новосибирский
государственный
технический
университет

Удельная стоимость энергоблока на основе CO₂ циклов в сравнении с другими технологиями

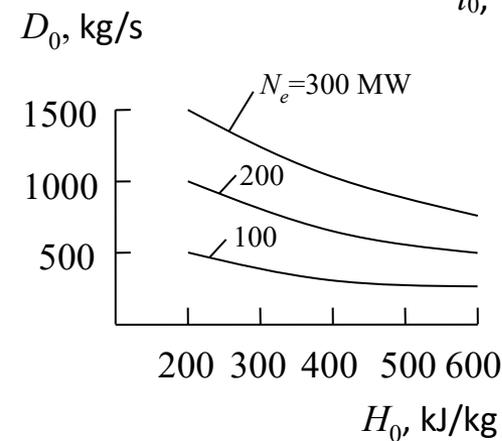
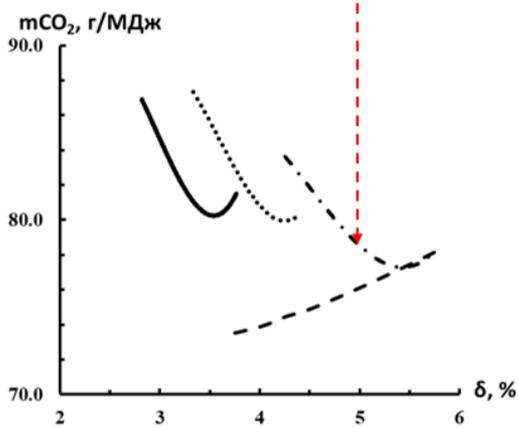
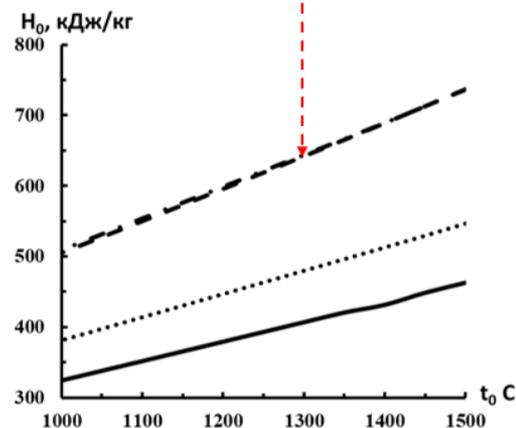
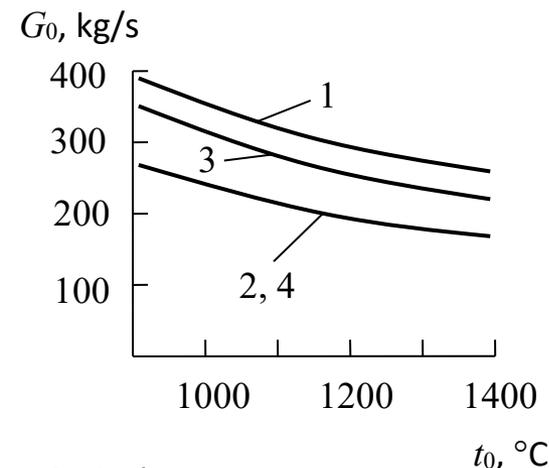
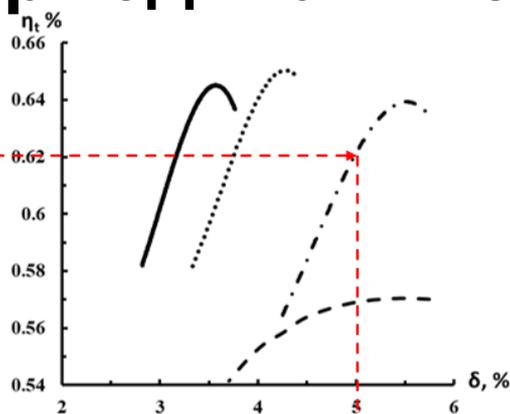
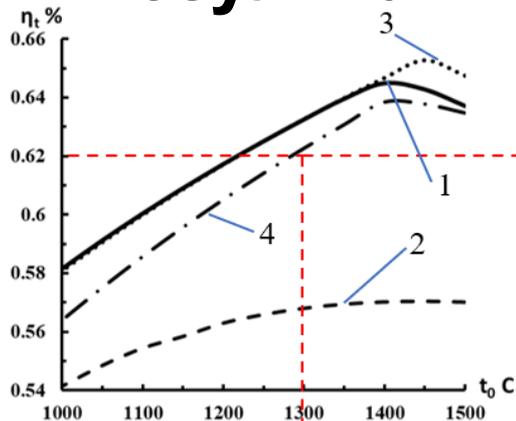
$k, \$/kW$



* В традиционных энергоблоках не учтена стоимость технологии улавливания и хранения CO₂

N, MW

Результаты термодинамического анализа



Обозначения:

- 1 – Цикл 75-300 бар с подъемом давления в 1 ступень насосом
- 2 – Цикл 30-300 бар с подъемом давления в 1 ступень компрессором
- 3 – Цикл 57-300 бар с конденсацией CO₂ и подъемом давления в 1 ступень насосом
- 4 – Цикл 30-200 бар со сжатием в системе компрессор+насос

Расчетные характеристики агрегатов и систем энергоблока на углекислом газе

Анализ зависимостей ведется в диапазоне начальных параметров 900-1500 °С; 150-300 бар.

Мощность насосов:

$$N_{притр} = \frac{D_0 \cdot v \cdot \Delta P}{\eta_{притр} \cdot \eta_{ет}} \cdot 10^{-6}$$

Мощность компрессоров:

$$N_k = \frac{D_0 \cdot H_k}{\eta_k \cdot \eta_{ет}^k} \cdot 10^{-3}$$

Мощность дутьевых вентиляторов:

$$N_b = 3,6 \cdot D_0 \cdot k_b \cdot m \cdot 10^{-3}$$

Мощность ВРУ:

$$N_a = B \cdot V_{O_2} \cdot k_s \cdot 3,6 = 5,86 \cdot k_{уд} \cdot B$$

Агрегат	Показатель эффективности (КПД или удельные энергозатраты)
Насосы	0,9
Компрессоры	0,85
Электромеханический КПД привода насоса	0,99
Электромеханический КПД привода компрессора	0,95
CO ₂ турбина (внутренний относительный КПД)	0,92
Камера сгорания	0,99
Электрогенератор	0,99
Транспорта теплоты	0,99
ВРУ	0,4 кВтч/кг O ₂
Сухая градирня (вентиляторы воздуха)	0,023 кВтч/т воздуха при кратности циркуляции 150 (отношение расхода воздуха к расходу рабочего тела)

Публикации

- Техничко-экономическая оценка энергоблоков электростанций / П.А. Щинников, О.К. Григорьева, И.С. Садкин. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2023. – 68 с. – ISBN 978-5-7782-4906-6.
- Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана / С.В. Алексеенко, П.А. Щинников, И.С. Садкин // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 89-98.
- Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane / I.S. Sadkin, P.A. Shchinnikov // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 234. Art. 121301 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121301>
- Influence of the initial parameters on the thermodynamic efficiency of carbon dioxide power cycles / P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin, N. F. Cheganova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : 12, Sochi, 25–27 октября 2021 года. – Sochi, 2022. – P. 012011. – DOI 10.1088/1742-6596/2150/1/012011.
- Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration / P. A. Shchinnikov, O. V. Borush, A. A. Frantseva, I. S. Sadkin // E3S Web of Conferences. Vol. 289. – Irkutsk: EDP Sciences, 2021. – P. 02001. – DOI 10.1051/e3sconf/202128902001.
- Особенности обновления рабочего тела полукрытого энергетического цикла на углекислом газе различной архитектуры / И.С. Садкин, П.А. Щинников // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : II Всерос. Науч.-тех. Конф.: сборник трудов конференции, Ульяновск, 05–07 октября 2022 года. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – С. 87-91.
- Влияние промежуточной регенерации на эффективность энергетических CO₂ циклов с двухступенчатым подъемом давления / И.С. Садкин, П.А. Щинников // Проблемы Совершенствования топливно-энергетического комплекса : Материалы XVI Международной научно-технической конференции, Саратов, 11–13 октября 2022 года. Том Выпуск 11. – Саратов: Саратовский ГТУ имени Гагарина Ю.А., 2022. – С. 206-212.