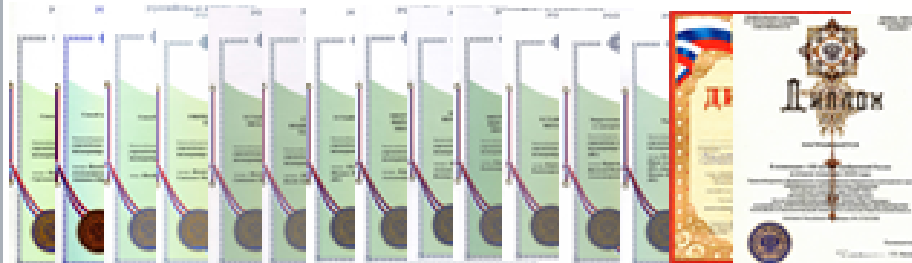
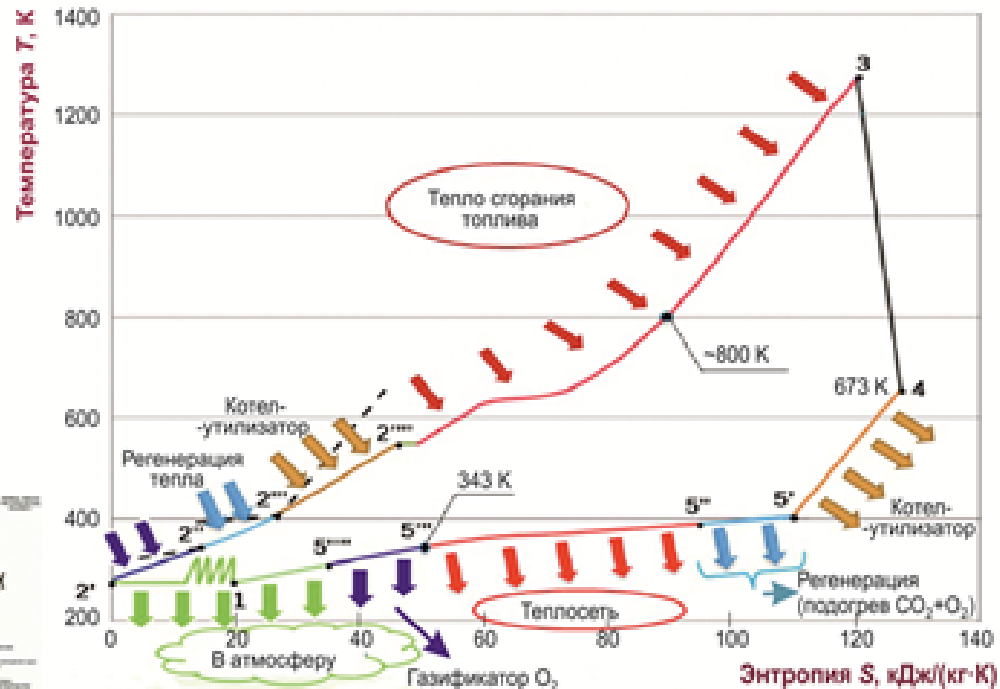
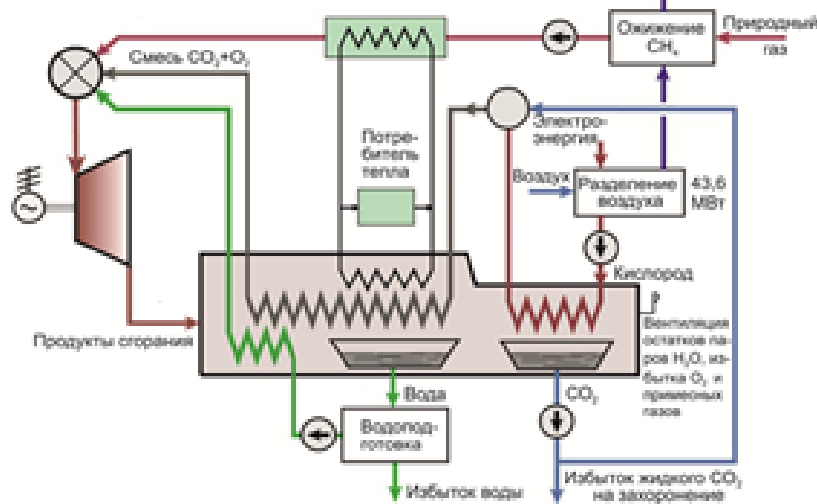


**СОЗДАНИЕ БЕСКОМПРЕССОРНОЙ
ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С
ВНУТРИЦИКЛОВЫМ УЛАВЛИВАНИЕМ CO₂ В
ЖИДКОЙ ФАЗЕ
(КНТП «ТЭЦ без выбросов»)**

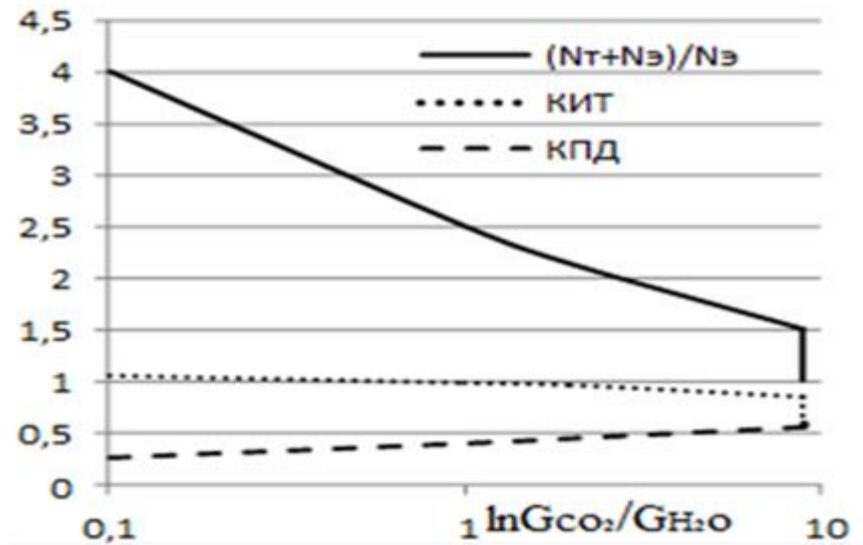
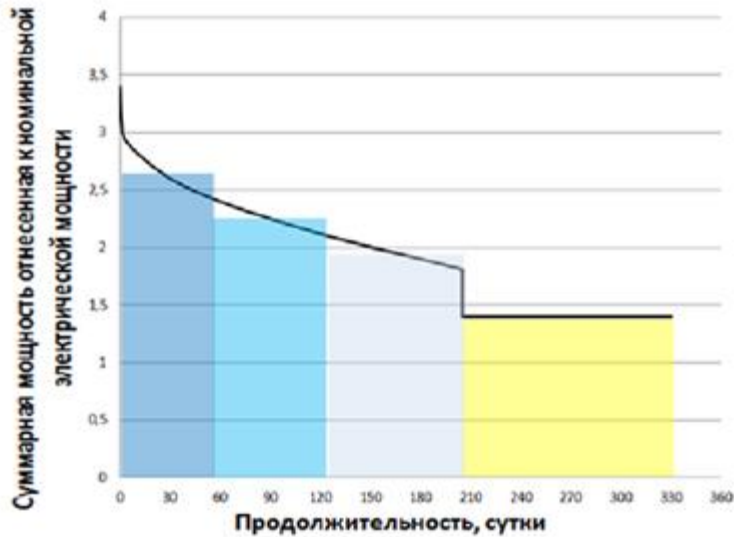
ОИВТ РАН - Москва-2022

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ БКПГУ БЕЗ ВЫХЛОПА

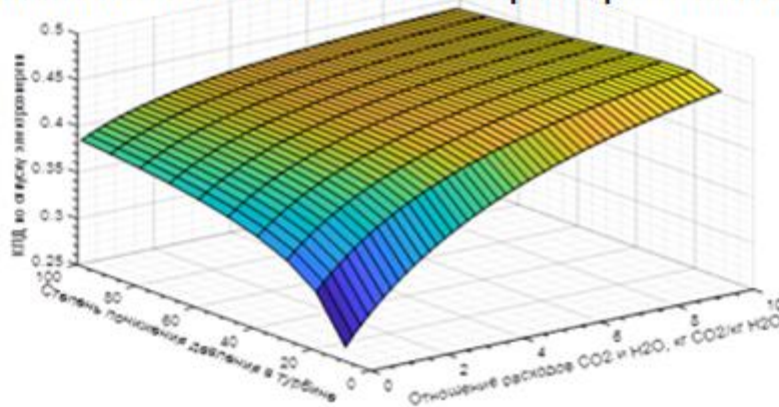


- по эффективности не уступает современным ПГУ;
- климатически и экологически безопасна;
- 100% утилизация CO₂ выхлопа в жидкой фазе - наиболее удобной для транспортировки;
- большая удельная мощность турбины - малые весогабариты и низкие кап.затраты строительства;
- генерация воды высокого качества - пригодна для использования в различных технологиях и питания тепловой сети;
- аккумулялирование компонентов рабочего тела и распределение энергетических затрат на их производство с обеспечением «сглаживания» суточного графика потребителя энергии;

БКПГУ-ТЭЦ



- широкий диапазон независимого регулирования производством тепловой и электрической энергией (обеспечение графика теплосети без пиковых котлов);
- использование существенной части теплоты парообразования топливной воды;



- регулирование мощности практически без изменения КПД за счет изменяя давление в камере сгорания;
- возможность компенсации индуктивной и ёмкостной реактивной мощности сети

Сравнение БкПГУ с современными ПГУ

Показатель	ПГУ-325	ПГУ-450Т	ПГУ-800	ПГУ лучший мировой	БкПГУ 60 МВт Пилотный образец	БкПГУ 600 МВт Коммерческая электростанция
Производство только электроэнергии						
Мощность электрическая, МВт	325	450	808	600	60	600
КПД без учета затрат на улавливание CO ₂ , %	51,7	51	54,6	62,2	50	54
Затраты энергии на улавливание CO ₂ , %	10-15	10-15	10-15	10-15	1,5	1,5
Доля уловленного CO ₂ , %	90	90	90	90	~100	~100
КПД с учетом затрат на улавливание CO ₂ , %	36,7-41,7	36-41	39,6-44,6	47,2-52,2	48,5	52,5
Совместное производство электричества и тепла						
Условный относительный годовой расход топлива ^[1] без учета затрат на улавливание CO ₂	0,94	0,945	0,92	0,87	0,88	0,85
Условный относительный годовой расход топлива ^[2] с учетом затрат на улавливание CO ₂	1,05-1,1	1,05-1,1	1,03-1,08	0,98-1,03	0,89	0,86

^[1] Годовой расход топлива, отнесенный к условному эталону. За условный эталон принята теплофикационная паротурбинная установка Т-250/300-240. Все варианты и условный эталон приведены к равным условиям (установки приведены к равной номинальной мощности, генерируют одинаковое количество энергии с одинаковым температурным графиком).

^[2] Условный эталон не корректировался на улавливание CO₂.

Сравнение цикла БкПГУ с циклом Аллома

Для производства только электроэнергии эти два цикла достаточно близки.

Для совместного производства электричества и тепла (что актуально для российской теплоэнергетике) цикл БкПГУ существенно превосходит цикл Аллома.

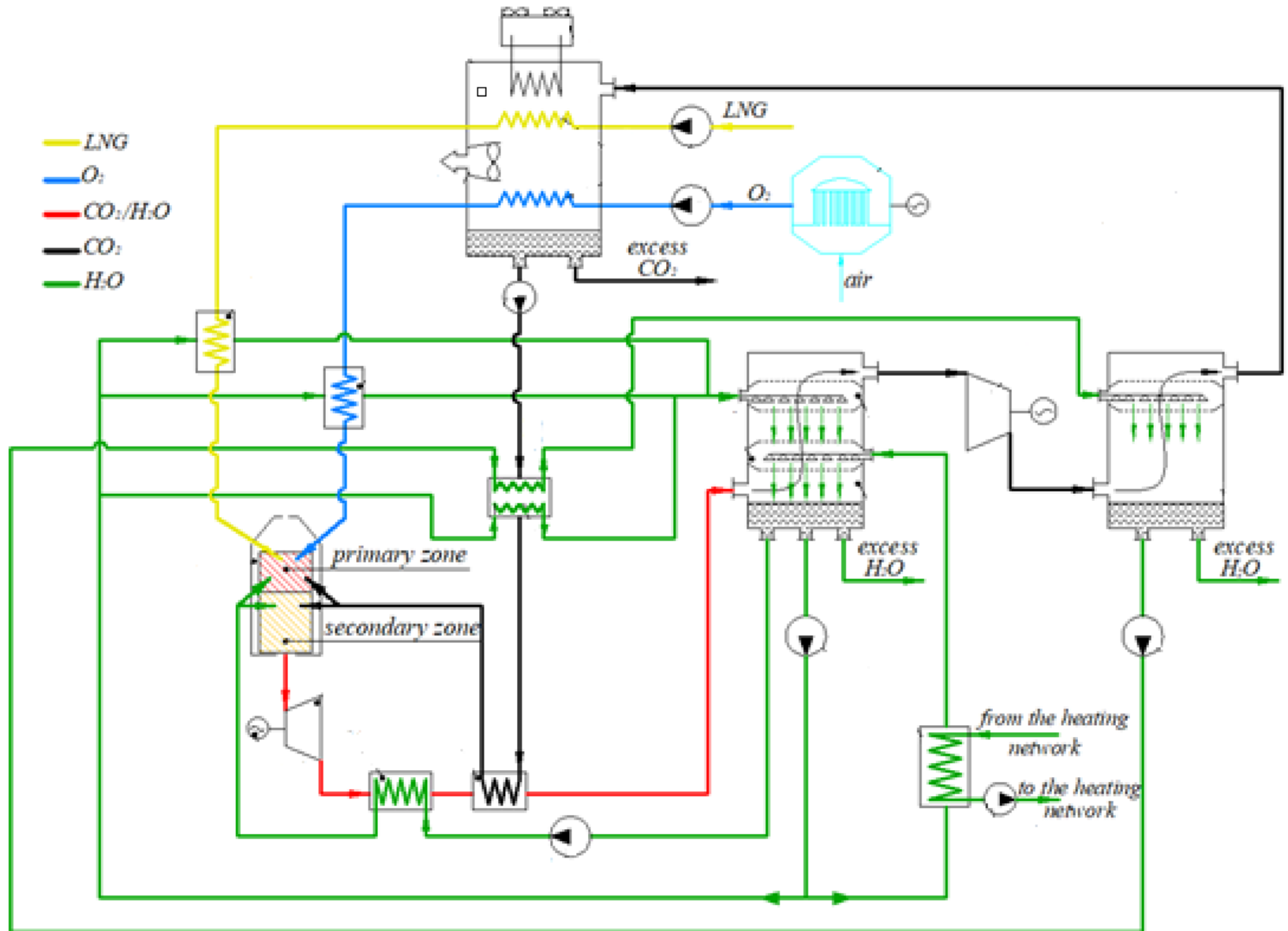
E3S Web of Conferences **209**, 03023 (2020)

ENERGY-21

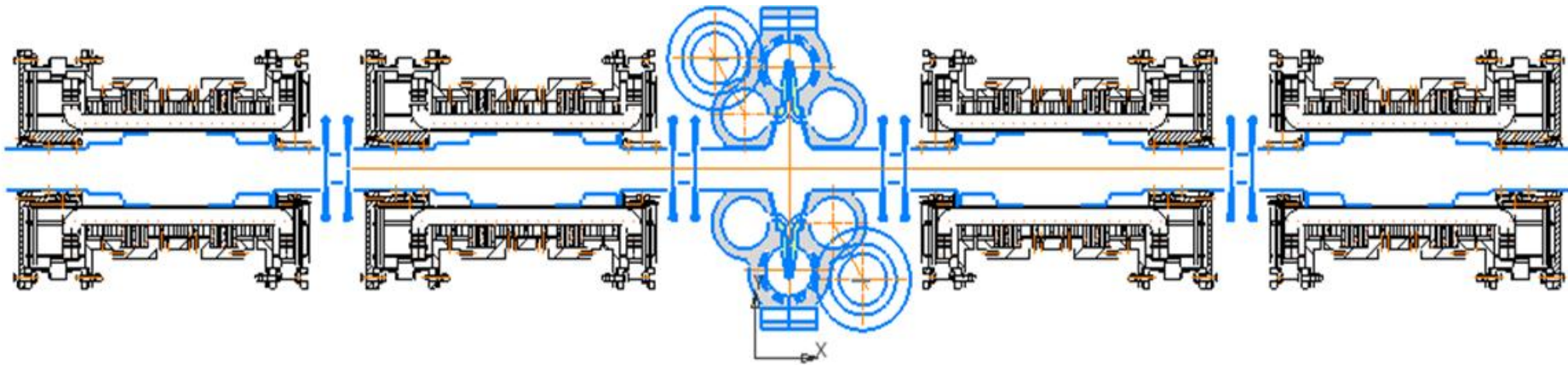
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903023>

Comparative analysis of the Allam cycle and the cycle of compressorless combined cycle gas turbine unit

БКПГУ-ТЭЦ



Полигон-электростанция на базе БкПГУ мощностью 60 МВт



Принципиальная схема безредукторного турбинного блока с генераторами



Генератор ГТГ 1000

– возможность компенсации индуктивной и ёмкостной реактивной мощности сети



3-D модель корпуса блока парогазовой турбины

ПАРАМЕТРЫ БЕЗКОМПРЕССОРНОЙ ПГУ МОЩНОСТЬЮ 60 МВт

Величина		Численное значение	Примечания
На входе в камеру сгорания			
СПГ	Максимальный расход, кг/с	2,5	
	Максимальное давление, МПа	35	
	Максимальная температура, К	400	
	Максимальный объемный расход, м ³ /с	0,016	Уд. Объем 0,0064
	Максимальная скорость, м/с	30	
	Площадь сечения каналов, м ²	0,00055	Труба Ду 30
Кислород	Максимальный расход, кг/с	10	
	Максимальное давление, МПа	35	
	Максимальная температура, К	400	
	Максимальный объемный расход, м ³ /с	0,03	Уд. Объем 0,003
	Максимальная скорость, м/с	30	
	Площадь сечения каналов, м ²	0,001	Труба Ду 40
H ₂ O	Максимальный расход, кг/с	50	
	Максимальное давление, МПа	35	
	Максимальная температура, К	600	
	Максимальный объемный расход, м ³ /с	0,5	Уд. Объем 0,01
	Максимальная скорость, м/с	30	
	Площадь сечения каналов, м ²	0,017	4 Трубы Ду 60
CO ₂	Максимальный расход, кг/с	150	
	Максимальное давление, МПа	35	
	Максимальная температура, К	800	
	Максимальный объемный расход, м ³ /с	0,7	Уд. Объем 0,0046
	Максимальная скорость, м/с	30	
	Площадь сечения каналов, м ²	0,023	4 Трубы Ду 70
На входе в первую ступень турбины			
Максимальный расход, кг/с	170		
Максимальное давление, МПа	30		
Максимальная температура, К	1300		
Максимальный объемный расход, м ³ /с	1,6	Уд. Объем 0,009	
Транзитная скорость, м/с	80		
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	0,02		

Диаметр, м	0,64	Высота канала 10 мм
Диаметр колеса, м	0,45	U=550; n = 24 000 N = 2 x 6 МВт
На выходе из первой ступени турбины		
Максимальный расход, кг/с	170	2 x 85
Максимальное давление, МПа	10	
Максимальная температура, К	1120	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	2 x 1,85	Уд. Объем 0,022
Транзитная скорость, м/с	150	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	2 x 0,012	
Диаметр колеса, м	0,3	Высота лопатки 15 мм
Диаметр канала, м	4 x 0,15	Скорость 60 м/с
На входе во вторую ступень турбины		
Максимальный расход, кг/с	2 x 85	
Максимальное давление, МПа	10	
Максимальная температура, К	1120	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	2 x 1,87	Уд. Объем 0,022
Транзитная скорость, м/с	80	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	2 x 0,023	
Диаметр, м	0,75	Высота канала 10 мм
Диаметр колеса, м	0,5	U=600; n = 24 000 N = 4 x 6 МВт
На выходе из второй ступени турбины		
Максимальный расход, кг/с	170	4 x 42,5
Максимальное давление, МПа	2,5	
Максимальная температура, К	950	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	4 x 2,95	Уд. Объем 0,07
Транзитная скорость, м/с	150	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	4 x 0,02	
Диаметр колеса, м	0,31	Высота лопатки 20 мм
Диаметр канала, м	8 x 0,15	Скорость 60 м/с
На входе в третью ступень турбины		
Максимальный расход, кг/с	2 x 85	
Максимальное давление, МПа	2,5	
Максимальная температура, К	950	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	2 x 5,9	Уд. Объем 0,07
Транзитная скорость, м/с	80	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	2 x 0,023	
Диаметр, м	0,75	Высота канала 25 мм

Диаметр колеса, м	0,55	U=660; n = 24 000 N = 4 x 6 МВт
На выходе из третьей ступени турбины		
Максимальный расход, кг/с	170	4 x 42,5
Максимальное давление, МПа	0,5	
Максимальная температура, К	800	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	4 x 10,7	Уд. Объем 0,25
Транзитная скорость, м/с	150	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	4 x 0,07	
Диаметр колеса, м	0,46	Высота лопатки 60 мм
Диаметр канала, м	4 x 0,5	Скорость 60 м/с
На входе в рекуператор		
Максимальный расход, кг/с	4 x 42,5	
Максимальное давление, МПа	0,5	
Максимальная температура, К	800	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	4 x 10,7	Уд. Объем 0,25
Транзитная скорость, м/с	30	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	4 x 0,14	
Диаметр рекуператора, м	4 x 1,2	Четыре параллельных секции
Длина рекуператора, м	1,5	
На входе в контактный конденсатор низкого давления		
Максимальный расход, кг/с	4 x 42,5	
Максимальное давление, МПа	0,5	
Максимальная температура, К	500	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	4 x 6,7	Уд. Объем 0,15
Транзитная скорость, м/с	3,8	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	4 x 1,8	
Диаметр контактного конденсатора, м	4 x 1,5	Четыре параллельных секции
Длина контактного конденсатора, м	5	
На входе в контактный конденсатор высокого давления		
Максимальный расход, кг/с	160	
Максимальное давление, МПа	3,5	
Максимальная температура, К	500	
Максимальный объемный расход, м ³ /с	4,2	Уд. Объем 0,026
Транзитная скорость, м/с	2,4	
Площадь сечения кольцевого канала, м ²	4 x 1,8	
Диаметр контактного конденсатора, м	4 x 1,5	Четыре параллельных секции
Длина контактного конденсатора, м	5	

Сравнение БкПГУ с современными энергетическими установками

Показатель	ПГУ-325	ПГУ-450Т	ПГУ-800	ПГУ лучший Мировой	БкПГУ 60 Пилотный образец	БкПГУ 600 Коммерческая электростанция
Производство только электроэнергии						
Мощность электрическая, МВт	325	450	808	600	60	600
КПД без учета затрат на улавливание CO ₂ , %	51,7	51	54,6	62,2	50	54
Затраты энергии на улавливание CO ₂ , %	10-15	10-15	10-15	10-15	1,5	1,5
Доля уловленного CO ₂ , %	90	90	90	90	~100	~100
КПД с учетом затрат на улавливание CO ₂ , %	36,7-41,7	36 - 41	39,6-44,6	47,2-52,2	48,5	52,5
Совместное производство электричества и тепла						
Условный относительный годовой расход топлива ^[1] без учета затрат на улавливание CO ₂	0,94	0,945	0,92	0,87	0,88	0,85
Условный относительный годовой расход топлива ^[2] с учетом затрат на улавливание CO ₂	1,05-1,1	1,05-1,1	1,03-1,08	0,98-1,03	0,89	0,86

^[1] Годовой расход топлива, отнесенный к условному эталону. За условный эталон принята теплофикационная паротурбинная установка Т-250/300-240. Все варианты и условный эталон приведены к равным условиям (установки приведены к равной номинальной мощности, генерируют одинаковое количество энергии с одинаковым температурным графиком).

^[2] Условный эталон не корректировался на улавливание CO₂.

Задачи НИОКР

- создание высокотемпературного теплообменного оборудования, в котором греющий теплоноситель – смесь водяного пара с углекислым газом, а холодный теплоноситель – углекислый газ в сверхкритическом состоянии с большим содержанием кислорода;
- создание контактного конденсатора водяного пара из смеси водяного пара с углекислым газом, обеспечивающего максимальный подогрев охлаждающей воды;
- создание высокоэффективной холодильной установки для конденсации углекислого газа;
- создание высокоэффективного турбодетандера для криогенной воздухоразделительной установки;
- создание кислородной камеры сгорания с балластирующими CO_2 и H_2O ;
- создание высокотемпературной парогазовой турбины;
- экспериментальные исследования рабочих процессов цикла БКПГУ (теплообмен, горение в потоке, смешение, конденсация);
- усовершенствование технологии обращения с рабочим телом - CO_2 ;
- оптимизация схемы и параметров теплоэнергетического комплекса с БКПГУ;
- конструкторско-технологическая проработка основного оборудования комплекса (парогазовой турбины, камеры сгорания, теплообменников, компрессора CO_2 , турбодетандера), изготовление макетов основных узлов и их испытания;
- проектирование основного энергетического оборудования энергетического комплекса с БКПГУ утвержденной мощности для строительства экспериментальной ТЭС;
- **создание опытно-промышленного энергетического комплекса с БКПГУ -60.**

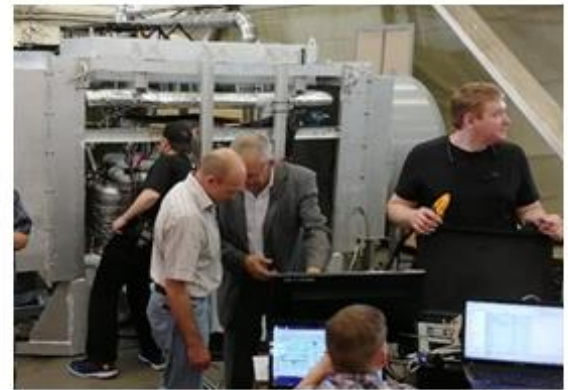
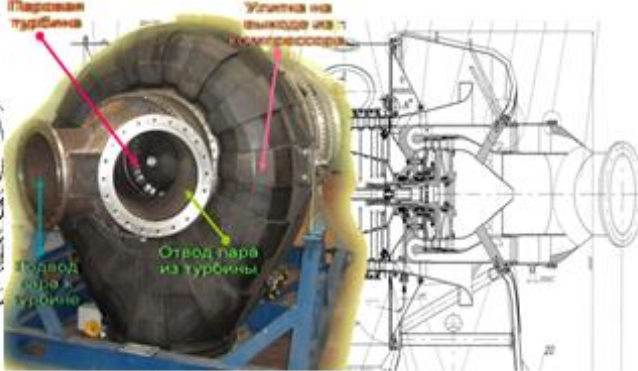
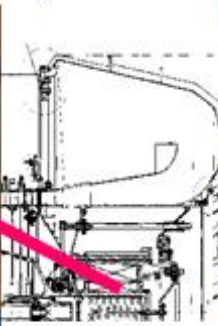
Опережающий НИОКР по БКПГУ

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

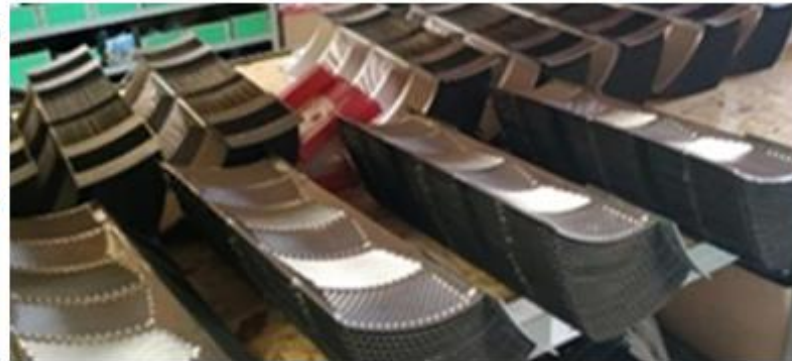
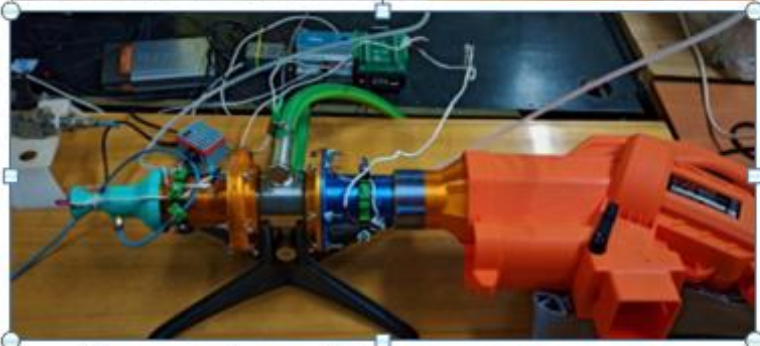
Паровой компрессор ХМ 1МВт с ЭД
($n=10000$ об/мин)

Паровой компрессор ХМ 16 МВт с
ПТ

Испытания ХМ 120 кВт



Создание высокоэффективных теплообменников

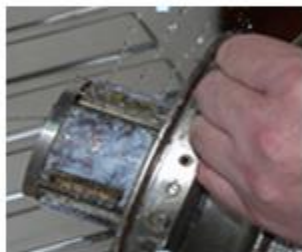


Опытные образцы ТО изготовленные с помощью аддитивных технологий и стенд для исследования образцов

Теплообменные матрицы и ТО рекуператоров ГТУ мощностью 1 МВт и 30 кВт ($G_r = 1 \text{ кг/с}$ и 300 г/с)

Испытания контактного конденсатора воды выхлопа ПГУ-60С $G_r = 100 \text{ кг/с}$

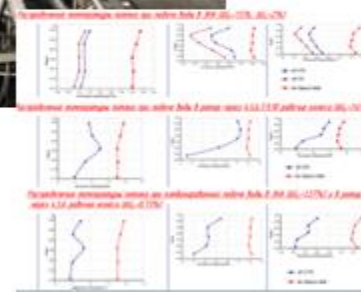
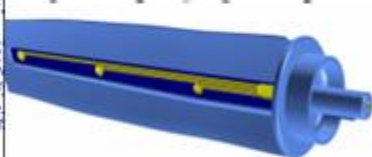
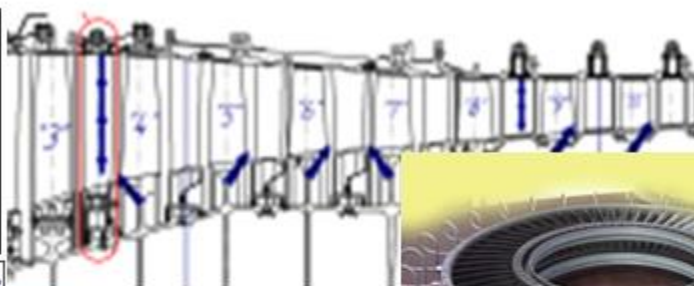
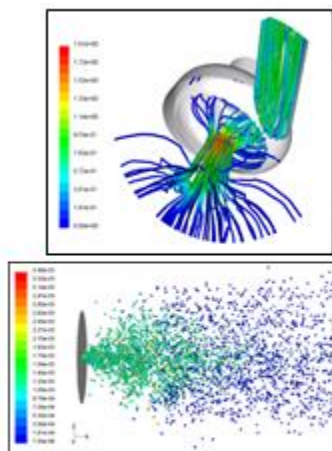
Опережающий НИОКР по БКПГУ СОЗДАНИЯ ПОДШИПНИКОВ НА ГАЗОВОЙ И ВОДЯНОЙ СМАЗКЕ



Подшипники на воде. Опорные для ГТУ $N_e=60$ МВт, $M_p=800$ кг, $n = 9600$ об/мин и ХМ $M_p=200$ кг, $n = 10000$ об/мин. Сдвоенный упорно-опорный подшипник для ГТУ $N_e=20$ МВт, $M_p=500$ кг, $n = 9200$ об/мин. Аналогов в мире нет

Подшипники на газе. Для ГТУ $N_e=1$ МВт, $M_p=250$ кг, $n=26000$. Аналогов в мире нет

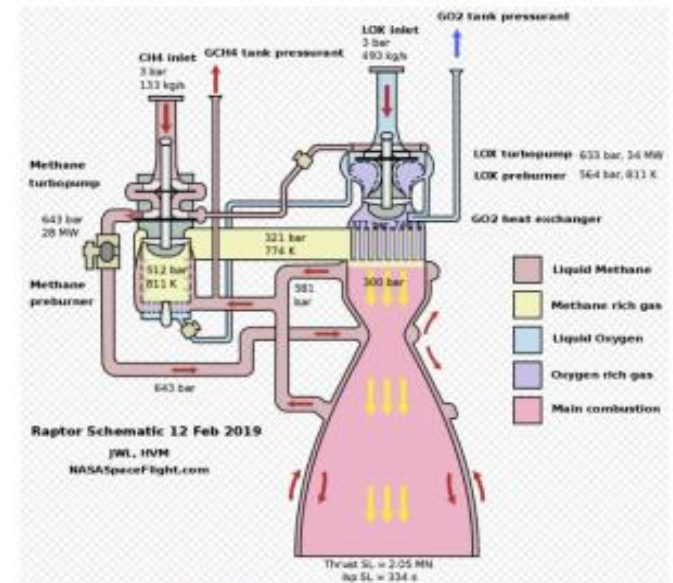
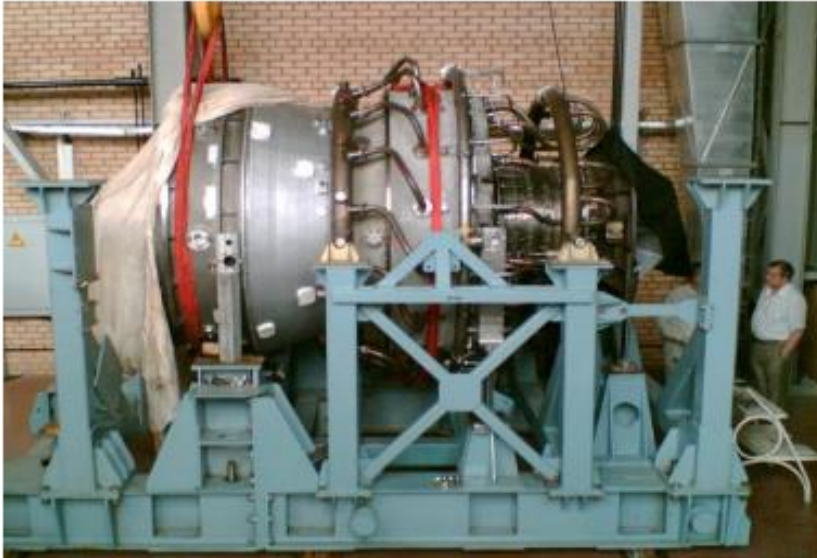
НИР изотермическое сжатие компрессора CO₂ рекуперативной части БКПГУ



Расчетная модель дробления каплей трехатомной жидкости, схема подачи жидкости в компрессор, спрямляющий аппарат с системой подвода жидкости через лопатки, испытания компрессора с подачей воды через лопатки на стенде и результаты испытаний

Камера сгорания

- параметры рабочих тел и условия горения близки к ЖРД;
- ресурс должен составлять десятки тысяч часов;
- нет ограничений по массе и габаритам

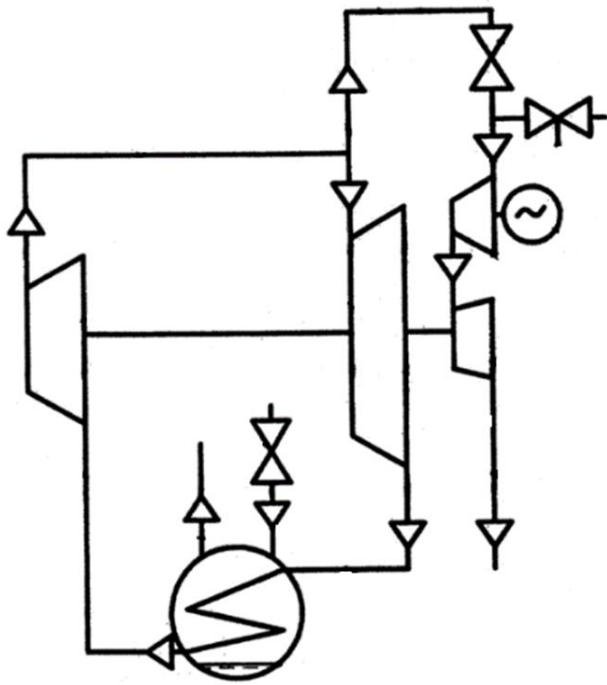


Камера сгорания ПГУ -60С, 2008г.



ЖРД «Раптор»,
SpaceX

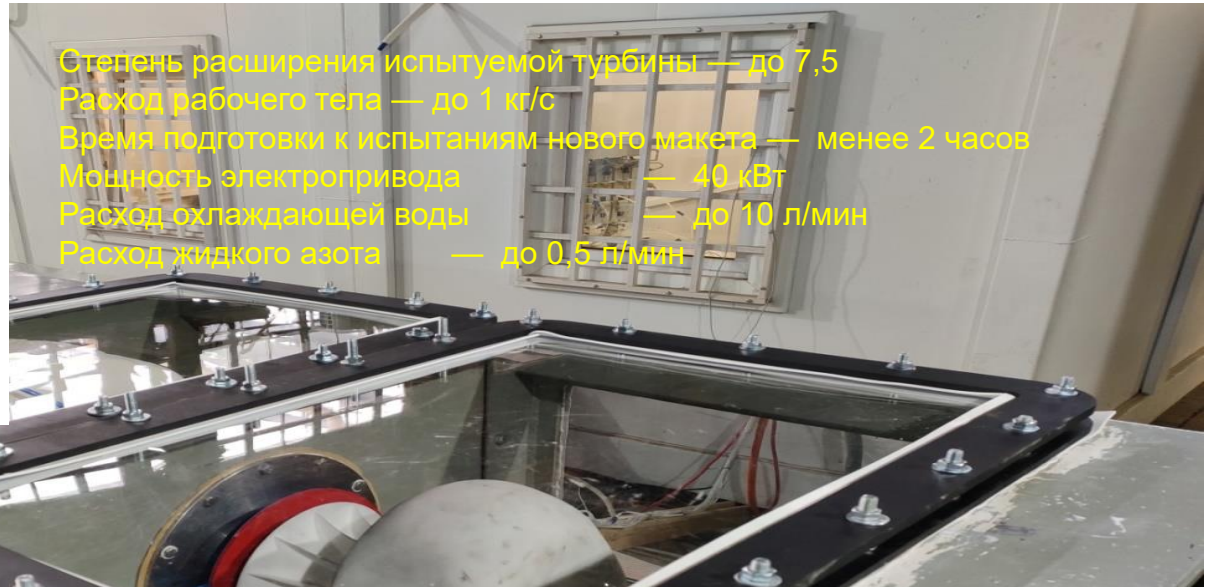
Экспериментальная проверка результатов расчета



Для исследования характеристик турбин, в соответствии с теорией подобия, в ОИВТ РАН создан уникальный стенд физического газодинамического эксперимента, обеспечивающий сокращение финансовых и временных затрат на подготовку экспериментов.

Стенд позволяет проводить испытания макетов турбин, изготовленных с применением аддитивных технологий из пластмассы или металла.

Степень расширения испытываемой турбины — до 7,5
Расход рабочего тела — до 1 кг/с
Время подготовки к испытаниям нового макета — менее 2 часов
Мощность электропривода — 40 кВт
Расход охлаждающей воды — до 10 л/мин
Расход жидкого азота — до 0,5 л/мин

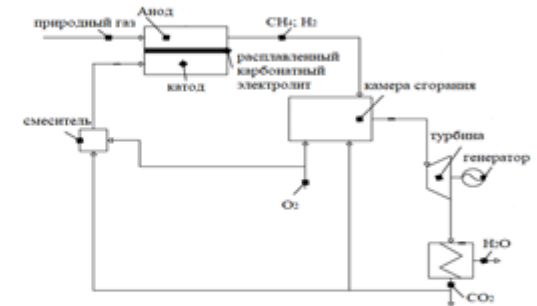


Эффективные энерготехнологические комплексы с БКПГУ

Мультигенерация и каптаж шахтного метана



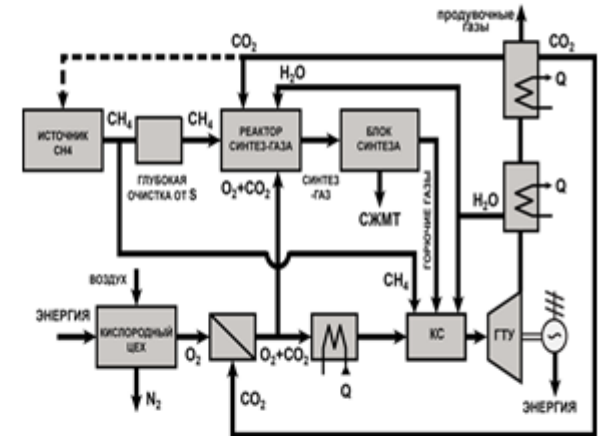
Гибридные установки БКПГУ + ТЭ



Использования холода-ресурса: СПГ- завод; СПГ -ТЭЦ



Производство жидких углеводородов



Использование ВИЭ с производством водорода, аммиака и карбамида

