Перспективные технологии с использованием ГТУ

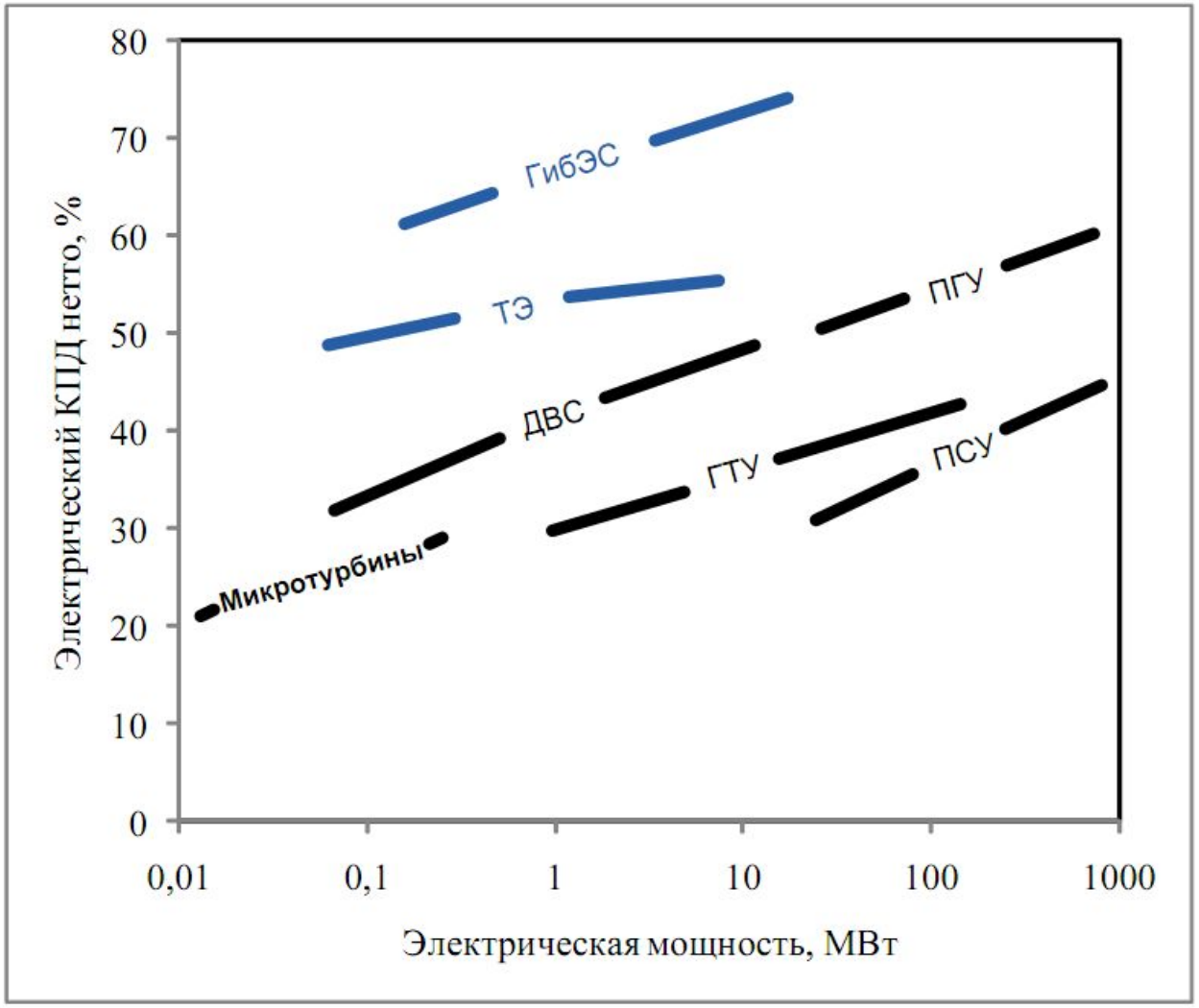


Рис. 1. Графики сравнения технологий производства электроэнергии

Основными составными элементами гибридных электростанций являются: топливные элементы, газотурбинные установки и газовоздушные теплообменники (рекуператоры)

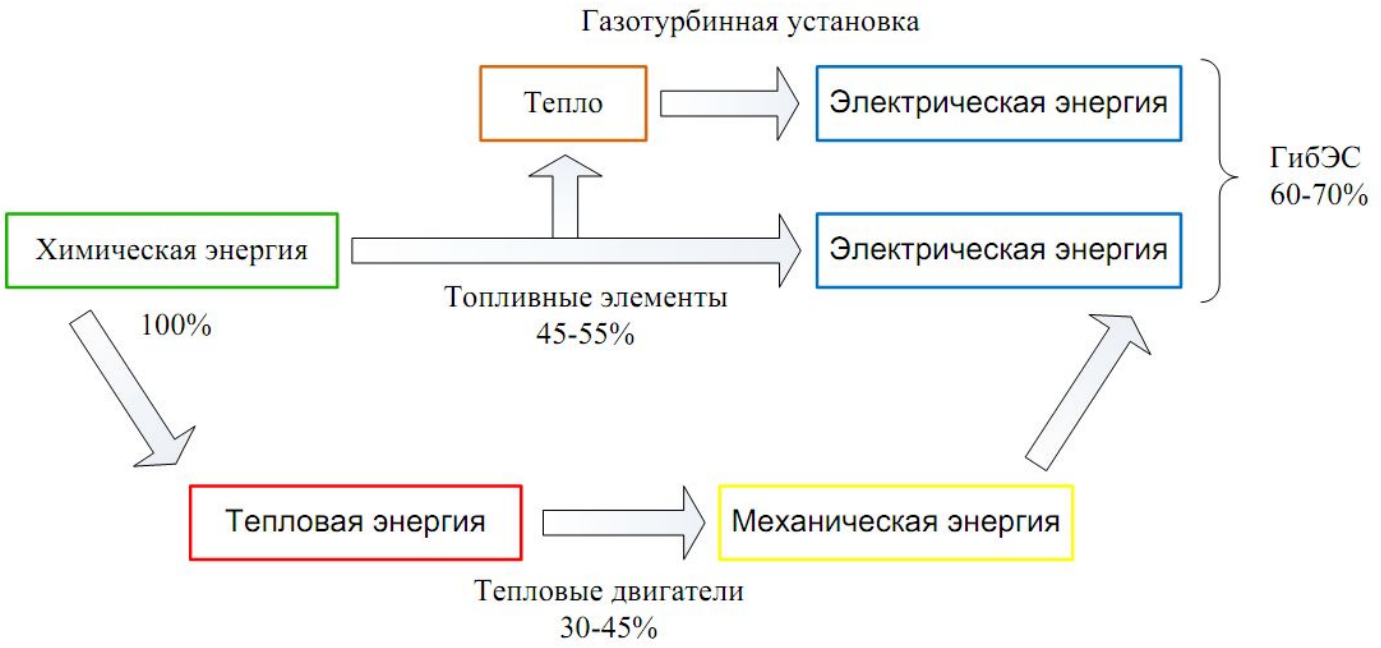


Рис. 2. Сравнение тепловых двигателей и ГибЭС

Ключевой составляющей гибридного цикла являются топливные элементы (ТЭ). Топливный элемент (ТЭ) – это устройство, в котором химическая энергия топлива (восстановителя) и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую энергию. ТЭ является разновидностью гальванического элемента и характеризуется электрохимический системой, т.е. совокупностью окислителя, восстановителя и ионного проводника (электролита). Как следует из определения, в ТЭ энергия химической реакции восстановителя R (англ. Reduction), и окислителя O (англ. Oxidation.) (обычно кислорода) преобразуется в электрическую энергию.

Обзор существующих и строящихся ГибЭС

Компания	Эл. мощность, кВт	Эл. КПД нетто (ПГ), %	Статус установок
Siemens-Westinghouse Power Generation (США-Германия)	220	52	Запущена в 2000 г
	300	55	Запущена в 2003 г.
	500-1000	57-60	Разрабатывается (2010-12г.)
Fuel Cell Energy (США)	250	52	Запущена в 2002 г.
	250	56	Запущена в 2004 г.
Mitsubishi Heavy Industries (Япония)	200	52,1	Запущена в 2006 г.
	700	60	Разрабатывается (2010)
General Electric (США)	свыше 1000	55-60	Разрабатывается (2013)
Rolls Royce Fuel Cells (Великобритания)	1000	-	Построена (2008)
Аэрокосмический центр Германии (DLR) (Германия)	200	-	Строится (2010)
Ztek (США)	250	-	Строится (2012)

В мировой промышленности крупные производители энергетического оборудования уже продемонстрировали первые пилотные установки. Компании «Siemens-Westinghouse», «Fuel Cell Energy» и «Mitsubishi» построили установки по 220, 250 и 200 кВт с электрическим КПД 53, 56% и 52,1 соответственно. Также в разработке ряд установок от 200 до 1000 кВт находится у компаний «Rolls Royce», «DLR», «Ansaldo», «J-Power», «IHI», а компания «GE Energy» проектирует установку в несколько МВт

Токообразующая реакция в общем виде:

$$mR + nO = R_mO_n, \quad (1.1)$$

где m и n – стехиометрические коэффициенты.

В качестве примера реакции (1.1) можно привести реакции окисления водорода и метана:

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O; \quad (1.2)$$

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O. \quad (1.3)$$

Реакция (1.1) является суммарной реакцией, которая может протекать как в тепловых машинах, так и в ТЭ. Необходимым условием ее протекания в тепловых машинах является активное столкновение молекул восстановителя (например, метана) и окислителя (кислорода), при этом электроны смещаются от молекул восстановителя к молекулам окислителя и происходит выделение теплоты. Это смещение в химической реакции протекает хаотично в любом направлении.

В отличие от химических в электрохимических реакциях, протекающих в ТЭ, обеспечивается направленное движение электронов от восстановителя к окислителю. В ТЭ суммарная токообразующая реакция (1.1) осуществляется в виде нескольких сопряженных процессов:

электрохимическое окисление восстановителя с отдачей электронов во внешнюю цепь:

$$mR \rightarrow mR^{n+} + mne; \quad (1.4)$$

электрохимическое восстановление окислителя:

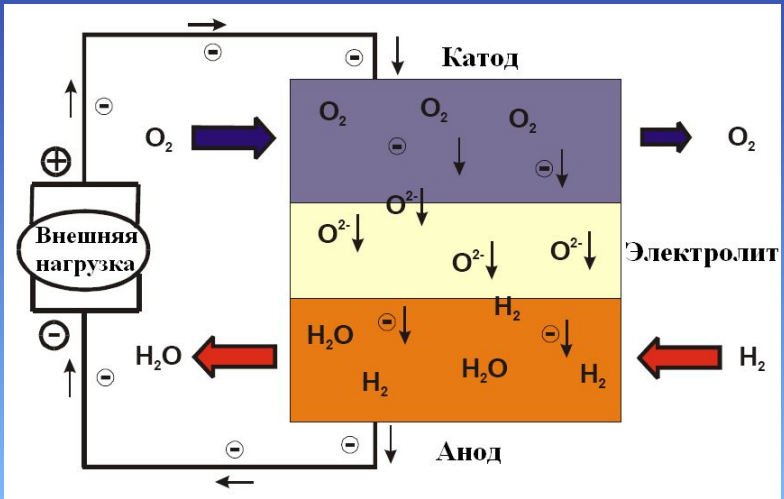
$$mO + nme \rightarrow nO^{m-}; \quad (1.5)$$

движение образующихся при окислении ионов между участками, где происходят реакции (1.4) и (1.5) и их взаимодействие с образованием продуктов реакции:

$$mR^{n+} + nO^{m-} \rightarrow R_mO_n; \quad (1.6)$$

движение электронов от участка, где происходит реакция (1.4), к участку, где происходит реакция (1.5), т.е. возникает электрический ток.

Из исходных веществ R и O получается тот же продукт, что и при химической реакции, но одновременно генерируется электрический ток, т.е. химическая энергия прямо превращается в электрическую. Для осуществления реакции (1.1) по стадиям электроокисления и электровосстановления необходимо отделить окислитель от восстановителя, обеспечить раздельное протекание реакций (1.4) и (1.5) и направленное движение электронов и ионов. Все эти функции выполняет ТЭ.



Элемент состоит из двух электродов и электронного проводника (электролита) между ними. На одном из электродов происходит реакция электроокисления топлива. Такой электрод в электрохимии называют анодом, в ТЭ его также называют топливным электродом. На втором электроде протекает электрохимическое восстановление окислителя, как правило, кислорода. В электрохимии такой электрод называют катодом. Электроды в ТЭ служат для проведения электрохимических реакций, подвода или отвода электронов. В электролите происходит движение положительно или отрицательно заряженных частиц (ионов). Ионный проводник также служит для разделения окислителя и восстановителя. При работе ТЭ анод и катод замыкаются проводником первого рода, по которому электроны двигаются от анода к катоду, совершая на своем пути работу.

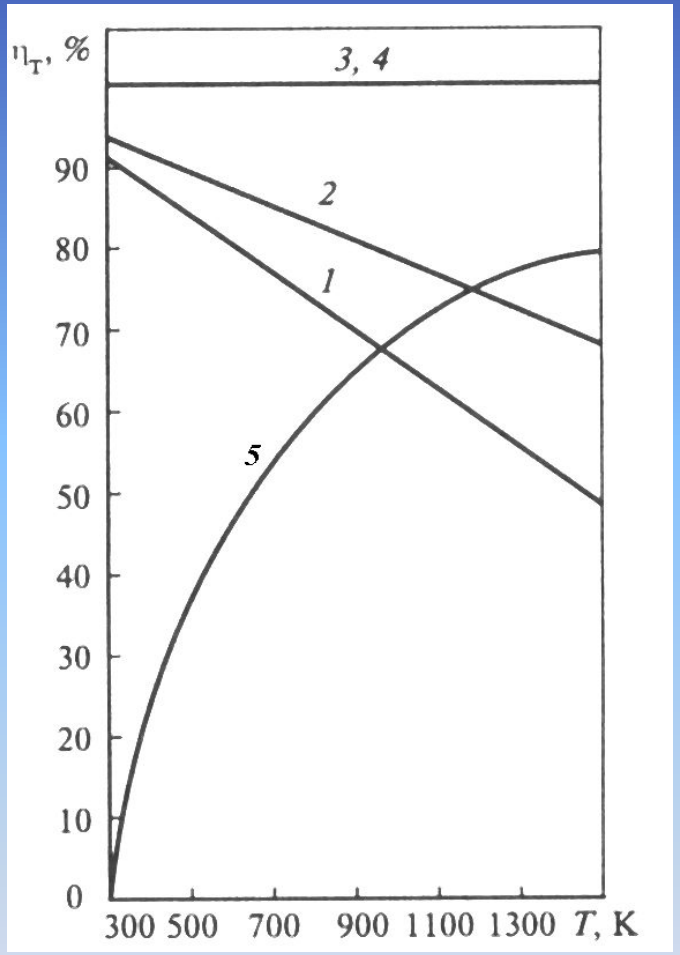
ЭДС топливного элемента можно определить по формуле:

$$E_э = -\Delta G/nF, \qquad (1.7)$$

где $-\Delta G$ – уменьшение свободной энергии (энергии Гиббса);

n – число моль-эквивалентов на 1 моль превращенного вещества;

F – постоянная Фарадея, равная примерно 96485 Кл/моль-экв.



1 – $2CO + O_2 = 2CO_2$

2 – $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

3 – $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$

4 – КПД цикла Карно

Как видно из рис. идеальный КПД метано-кислородного углеродно-кислородного ТЭ равен 1 (100%) и не зависит от температуры, идеальные КПД других двух ТЭ при 300 К близки к 1 (100%), но снижаются с увеличением температуры. Для сравнения на рис 1.2. приведена кривая зависимости идеального КПД (Карно) тепловой машины $\eta_т$, рассчитанной по уравнению

$$\eta_т = (T_2 - T_1)/T_2 \qquad (1.11)$$

где T_1 – верхняя температура; T_2 – нижняя температура, которая принималась равной 300 К. Лишь при температуре 1200 К термодинамические КПД тепловой машины и водородно-кислородного ТЭ сравниваются. Термодинамический КПД метано-кислородного ТЭ значительно выше КПД тепловой машины при любых температурах.

В реальные процессах измеряемое на зажимах работающего ТЭ напряжение U меньше ЭДС из-за поляризаций, падения напряжения вследствие активного сопротивления электролита и других компонентов ТЭ. В итоге:

$$U = E_э - \Delta E - IR, \qquad (1.12)$$

где ΔE - сумма поляризаций анода и катода;

I – ток;

R – активное сопротивление ТЭ, в основном, сопротивление электролита.

ВАХ – это графическое изображение зависимости напряжения ТЭ от тока (плотности тока)

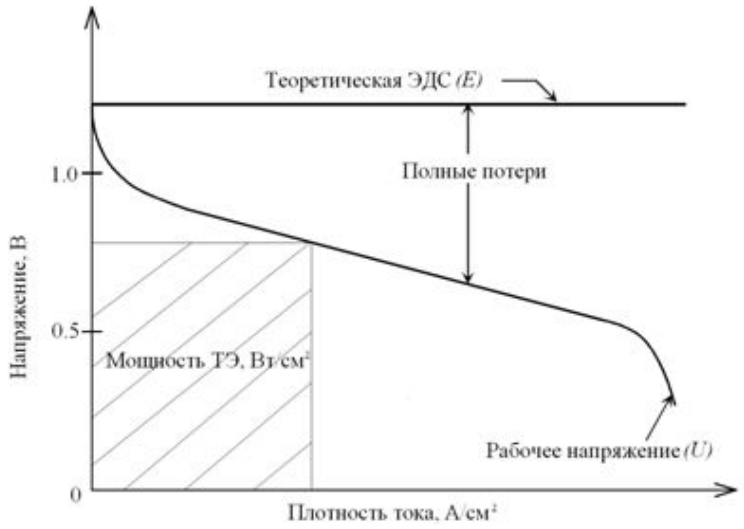


Рис. 6. Вольтамперная характеристика ТЭ

КПД ТЭ по напряжению:

$$\eta_U = U/E$$

Общий КПД ТЭ:

$$\eta_{ТЭ} = \eta_т \eta_U \eta_f$$

где η_f - степень использования топлива в ТЭ

В итоге полный КПД ТЭ определяется отношением работы, полученной в ТЭ, количеству подведенной к нему энергии:

$$\eta_{ТЭ} = nF\,\eta_f/(-\Delta H) = \eta_т \eta_u \eta_f, \qquad (1.13)$$

где η_u – КПД по напряжению, $\eta_u = U/E_э$;

η_f - фарадеевский КПД (степень использования топлива в ТЭ), равный отношению количества электричества $q_р$, реально полученного от 1 моль восстановителя (топлива), к теоретическому количеству электричества $q_э = nF$:

$$\eta_f = q_р/q_э. \qquad (1.14)$$

Уменьшение фарадеевского КПД ниже 1 может быть обусловлено неполным использованием реагента (топлива) из-за его потерь с отходящими газами и через неплотности и побочными реакциями.

В ГибЭС подводимое тепло в ГТУ Q_1 может складываться из трех составляющих

$$Q_{ГТУ} = Q_1 = Q_{реак} + Q_{н.т.} + Q_{кс}$$

$Q_{реак}$ – тепло, выделяющееся в процессе электрохимической реакции;

$Q_{н.т.}$ – тепло, выделяющееся при дожигании непрореагировавшего топлива;

$Q_{кс}$ – тепло, выделяющееся при подводе дополнительного топлива в КС.

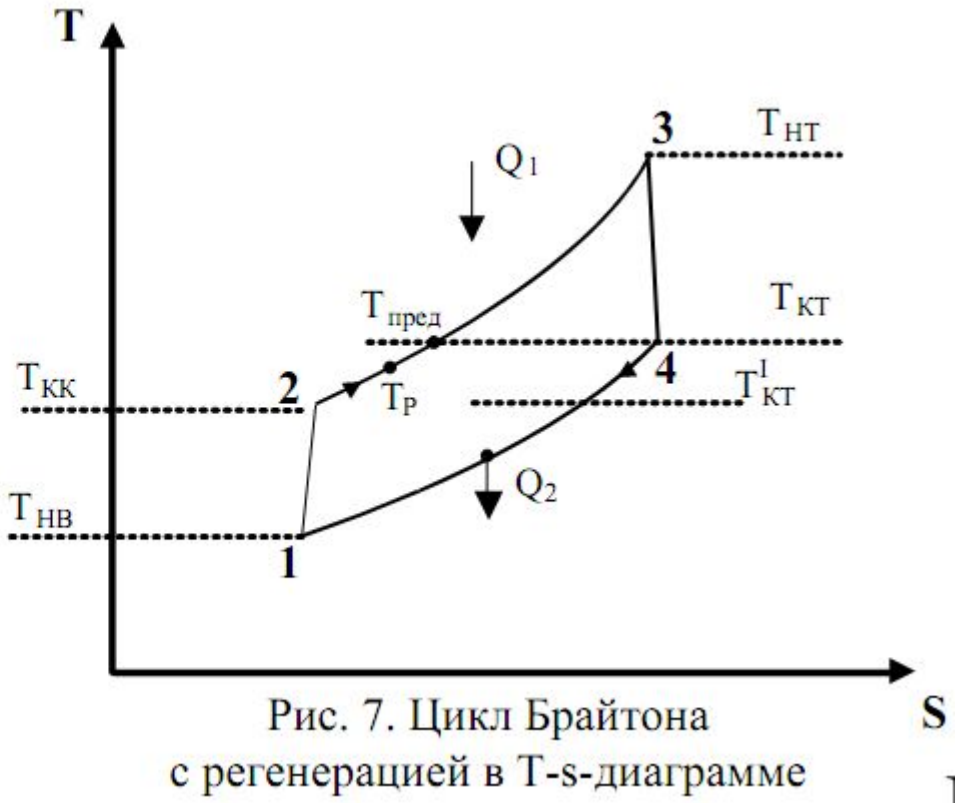


Рис. 7. Цикл Брайтона с регенерацией в T-s-диаграмме

В зависимости от применяемого электролита можно выделить следующие основные типы топливных элементов:

- твердополимерные (ТПТЭ). Эти топливные элементы отличаются компактностью, высокой степенью надежности и экологической безопасности. Электрический КПД твердополимерных топливных элементов составляет до 45%, рабочая температура - около 80 ^{o}C. В качестве топлива используется чистый водород. Серьезным препятствием на пути широкого распространения этих топливных элементов является высокая стоимость получаемой с их помощью электроэнергии (в ТПТЭ применяются катализаторы из платины и ее сплавов). Тем не менее, обладая уникальными качествами, они имеют хорошую перспективу для широкого применения.

- фосфорнокислые (ФКТЭ). Электрический КПД топливных элементов на фосфорной кислоте при выработке электроэнергии составляет до 40%, при совместном производстве тепла и электричества – до 80%. Рабочие температуры находятся в пределах 180...230 ^{o}C. ФКТЭ обладают относительно невысоким КПД и требуют некоторого времени для выхода на рабочий режим при холодном старте. Но при этом они отличаются относительно простой конструкцией.

- ТЭ на расплавленном карбонате (РКТЭ). Этот тип относится к высокотемпературным устройствам. Высокая рабочая температура ТЭ (600…700 ^{o}C) позволяет использовать в качестве топлива природный газ, который преобразуется встроенным конвертором в водород и монооксид углерода. Электрический КПД достигает 50%. В связи с большим количеством выделяемого при работе тепла, РКТЭ успешно применяются для создания стационарных источников электрической и тепловой энергии.

- твердооксидные (ТОТЭ). В этих топливных элементах вместо жидкого электролита применяется твердый керамический материал, что позволяет достигать высоких рабочих температур - 900…1000 ^{o}C. Электрический КПД составляет 45-50%. ТОТЭ могут работать на различных видах углеводородного топлива. Топливные элементы с твердым электролитом имеют хорошую перспективу для использования в промышленных установках средней и

Типы топливных элементов

Тип	Окислитель	Электролит	Температура работы, °С	Топливо
ТОТЭ	**Воздух**	**Твердооксидный**	**750-1000**	**H_2, CO, CH_4**
РКТЭ	Воздух, CO_2	Расплавленный карбонат	600-700	H_2, CO, CH_4
ФКТЭ	Воздух	Фосфорная кислота	200	H_2, CH_4
ТПТЭ	Воздух	Твердополимерный	80	H_2

Параметры ТОТЭ

Показатель	Описание
Материал электролита	$ZrO_2 + Y_2O_3$
Температура работы, °С	800-1000
Восстановитель	H_2 + CO
Окислитель	Воздух
Материал анода	$Ni + ZrO_2$
Материал катода	$La_xSr_{1-x}MnO_3$
Плотность тока, мА/см^2	150-1500
Напряжение, В	0,5-0,8

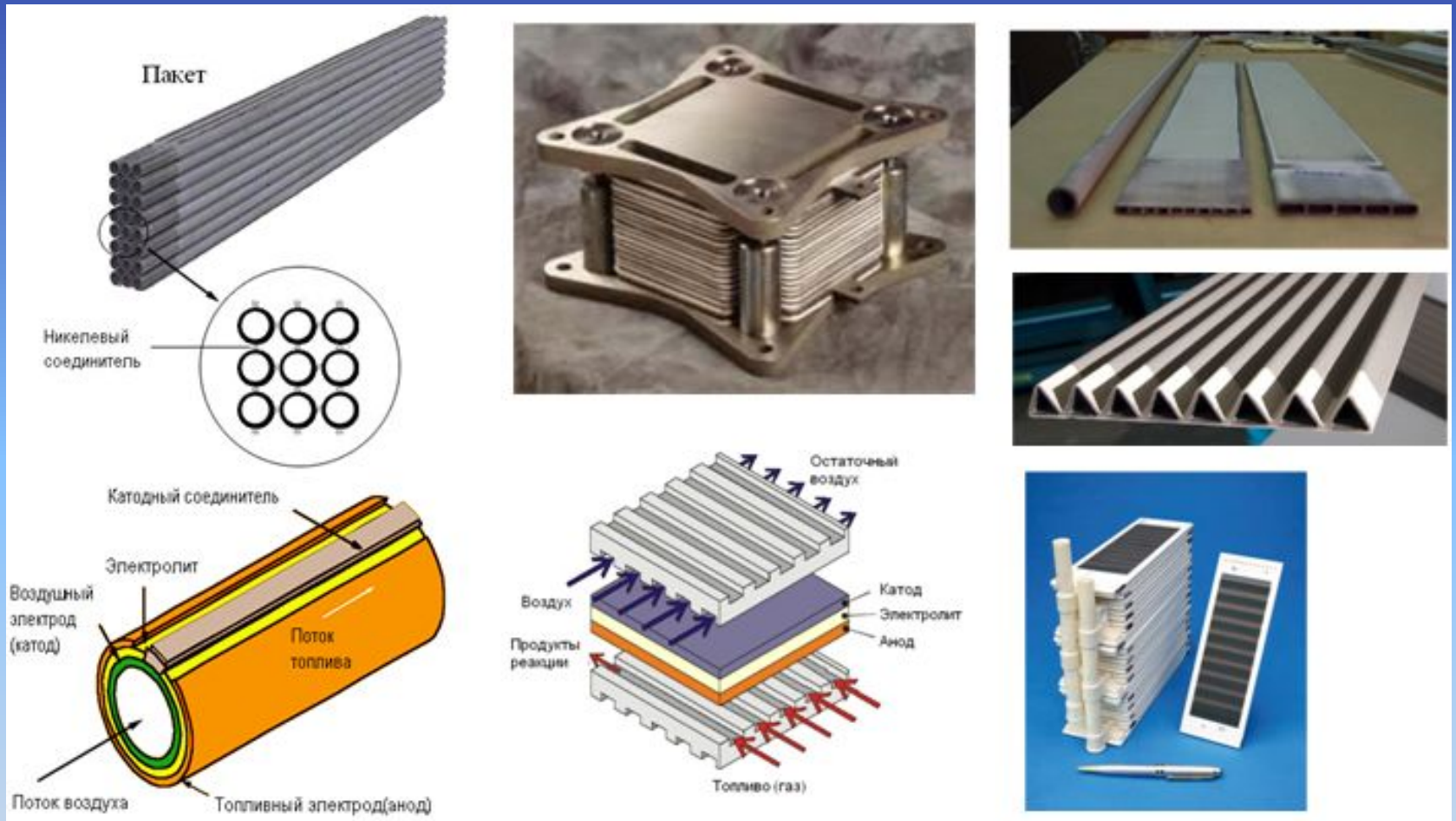


Рис. 4. Конструкции твердооксидных топливных элементов

ТОТЭ имеют два основных вида конструкций: цилиндрические и планарные. Одна из сложных проблем в ТЭ – это герметичность ячейки, а в цилиндрических элементах она упрощена. Это преимущество над остальными перевешивает другие недостатки, присущие цилиндрической форме - более низкий уровень плотности энергии и длинный путь тока.

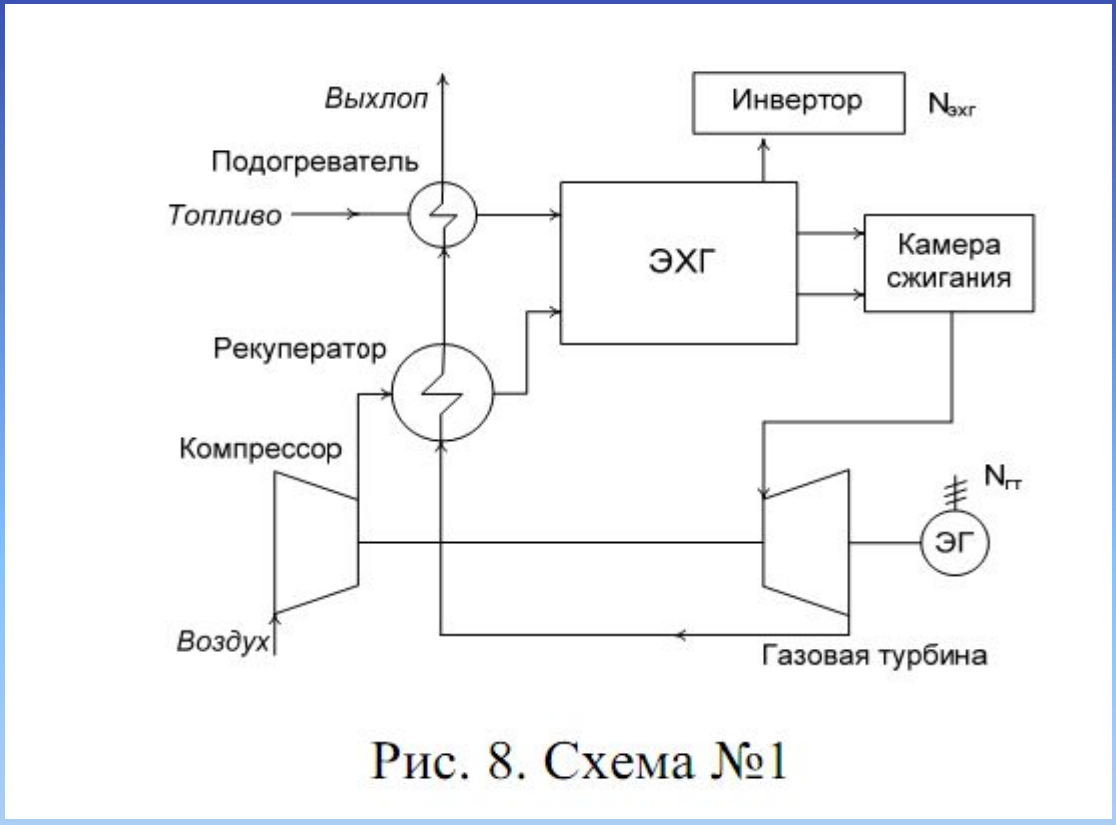


Рис. 8. Схема №1

Топливные элементы вырабатывают постоянный ток, поэтому в состав электрохимических установок входит инвертор для преобразования постоянного тока в переменный.

Вторым основным элементом ГибЭС является газотурбинная установка. Температура газов после ТОТЭ находиться в диапазоне 750-1000 ^{o}C. Это тепло и можно использовать для дополнительной выработки электроэнергии в ГТУ.

Важно отметить, что температура на входе в модуль ТОТЭ должна быть в интервале 500-650 ^{o}C для предотвращения термических ударов и возможных повреждений электрохимического генератора. Следовательно, рекуперация в гибридных установках необходима.

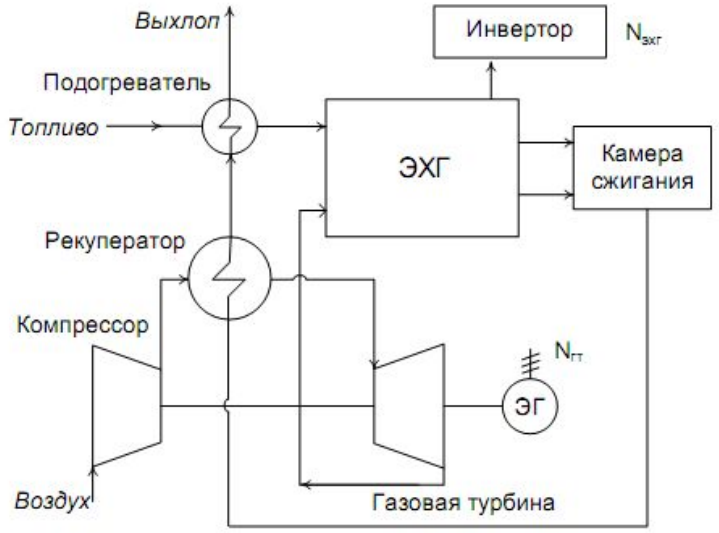


Рис. 9. Схема №2

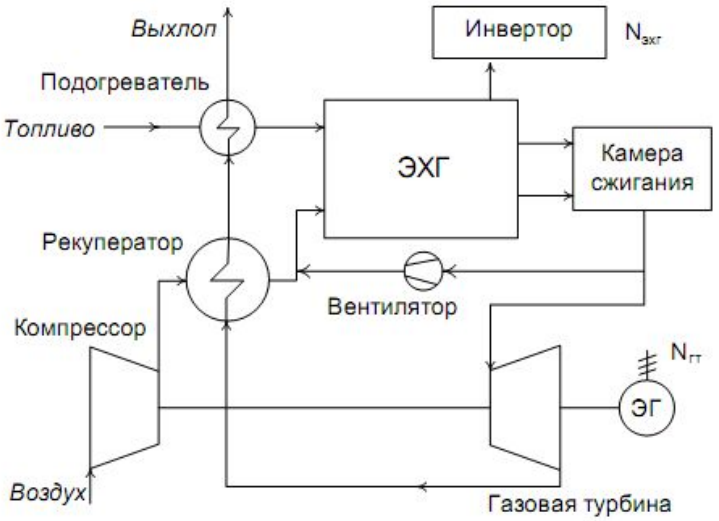


Рис. 10. Схема №3

В топливных элементах есть ограничения на разность температур на входе и на выходе (по причине значительных температурных напряжений). Из-за этого минимальное значение температуры воздуха перед ЭХГ составляет 500-650 ^{o}C. Этот факт накладывает ограничения на степень сжатия в компрессоре, и, как следствие, снижает производимую работу в газовой турбине, так как чем выше степень сжатия, тем ниже температура газов за газовой турбиной. Повышение давления сопровождается увеличением КПД топливных элементов и газотурбинного цикла, но с другой стороны сами по себе ТЭ значительно удорожаются.

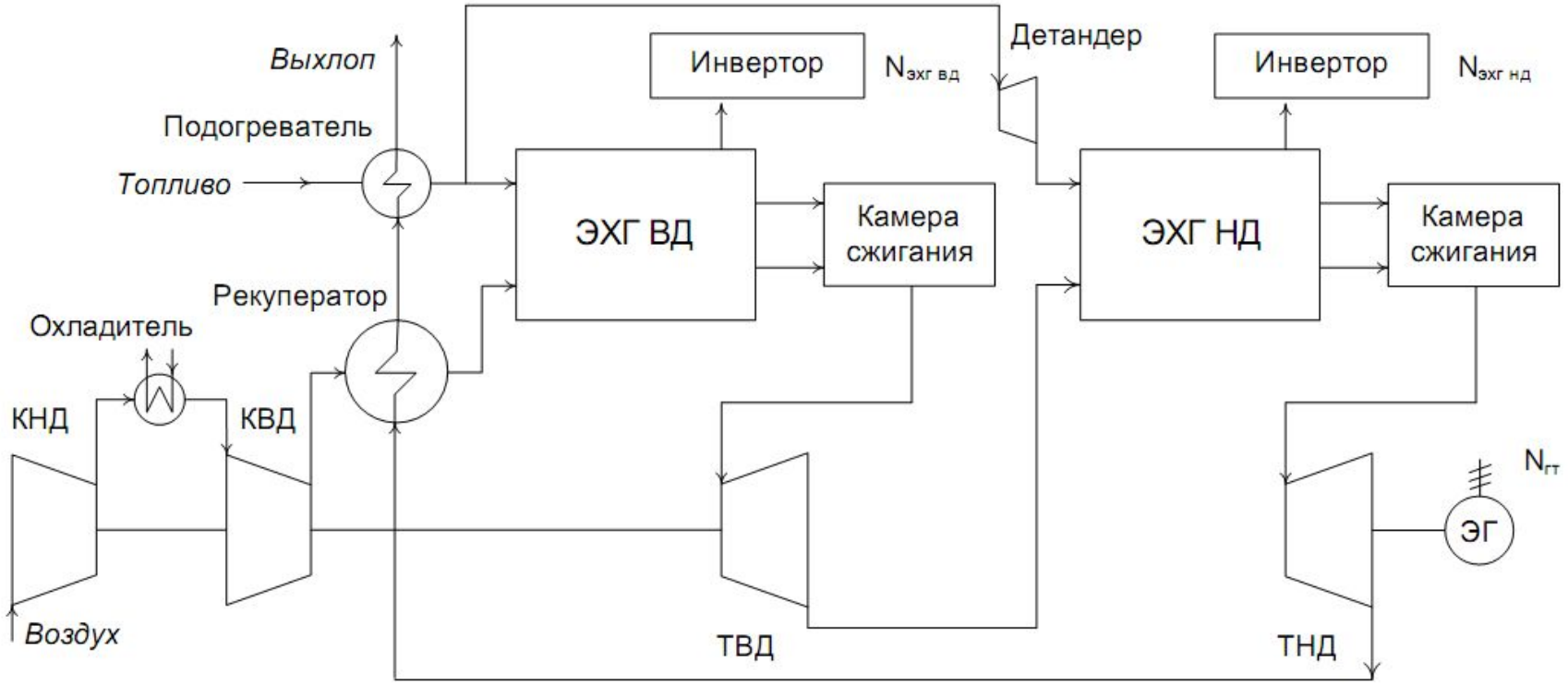


Рис. 11. Схема №4

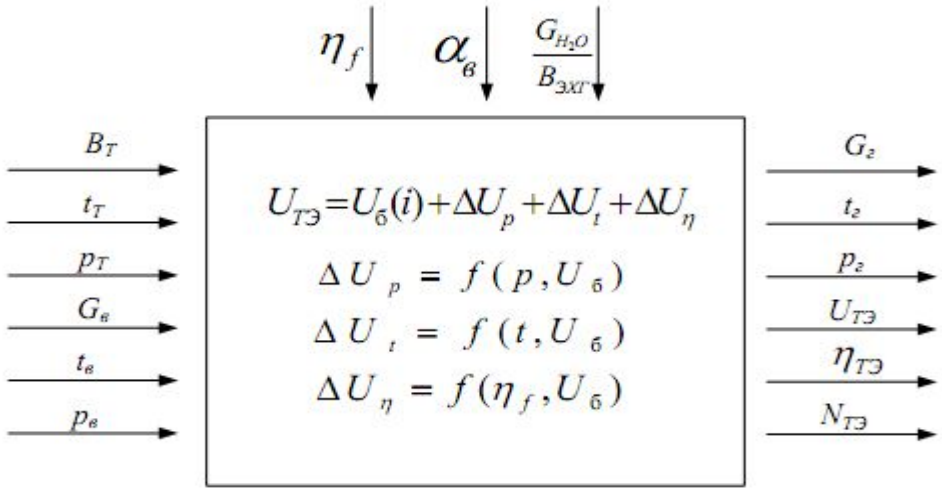


Рис. 13. Схема математической модели ЭХГ

Мощность ЭХГ:

$$N^{Э}_{ЭХГ} = \frac{B_т \eta_f n_e F}{1000M} U_{ТЭ} \eta_{инв}$$

где $B_т$ - расход топлива;
n_e – число электронов, участвующих в реакции;
F – постоянная Фарадея;
M - молярная масса топлива;
$U_{ТЭ}$ – напряжение ТЭ;
$\eta_{инв}$ – КПД инвертора;
η_f – степень использования топлива.

Мощность ГТУ:

$$N_{Э.ГТУ} = \left(N_{i.ГТ} \eta_{М.ГТ} - \frac{N_{i.К}}{\eta_{М.К}} \right) \eta_{ЭГ}$$

где $N_{i.ГТ}$, $N_{i.К}$ - внутренние мощности газовой турбины и компрессора;
$\eta_{М.ГТ}$, $\eta_{М.К}$ - механические КПД турбины и компрессора;
$\eta_{ЭГ}$ - КПД электрогенератора.

КПД ГибЭС по отпуску электроэнергии:

$$\eta^{Э.Нетто}_{ГибЭС} = \frac{N^{Э}_{ЭХГ} + N^{Э}_{ГТУ}}{Q_т} \text{x} (1 - э^{ГибЭС}_{СН})$$

Допущения и условия расчетов

- Использованы в качестве прототипа ТЭ компании Siemens-Westinghouse;
- Расчет проводился на расход топлива – 0,1 кг/с;
- В качестве топлива принят 100% метан;
- Степень использования топлива в ТЭ – 0,85;
- Плотность тока ТЭ – 250 мА/см^2
- КПД компрессора – 87%;
- КПД турбины – 88%;
- Условия ISO 2314 (температура наружного воздуха - 15 °С, влажность – 60%, давление 1,013 бар);
- Потери тепла через корпус ЭХГ и рекуператора – 1%;
- КПД инвертора – 94%;
- Степень регенерации рекуператоров – 90%;
- Гидравлическое сопротивление ЭХГ – 5%;
- Температура воздуха на входе в ЭХГ не ниже 550 °С;
- В КС ГТУ не подводилось дополнительное топливо для повышения мощности.

Сводная таблица результатов расчета тепловых схем

Показатель	Разм.	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4	Схема №4 с одним давле-нием
Рабочее давление ТЭ:						
- первой ступени	бар	3	1,1	3	5	3
- второй ступени	бар	-	-	-	2,3	-
Средняя плотность тока ТЭ	мА/см^2	250	250	250	250	250
Доля рециркуляции газов		-	-	0,5	-	-
Температура воздуха после охладителя	°С	-	-	-	35	35
Доля мощности ЭХГ	%	85,2	88,6	84,1	86,6	84,9
Доля мощность ГТУ	%	14,8	11,4	15,9	13,4	15,1
Электрический КПД ГибЭС брутто	%	64,2	59,3	65,1	63,1	64,4
Электрический КПД ГибЭС нетто	%	63,8	59,0	63,2	62,8	64,1

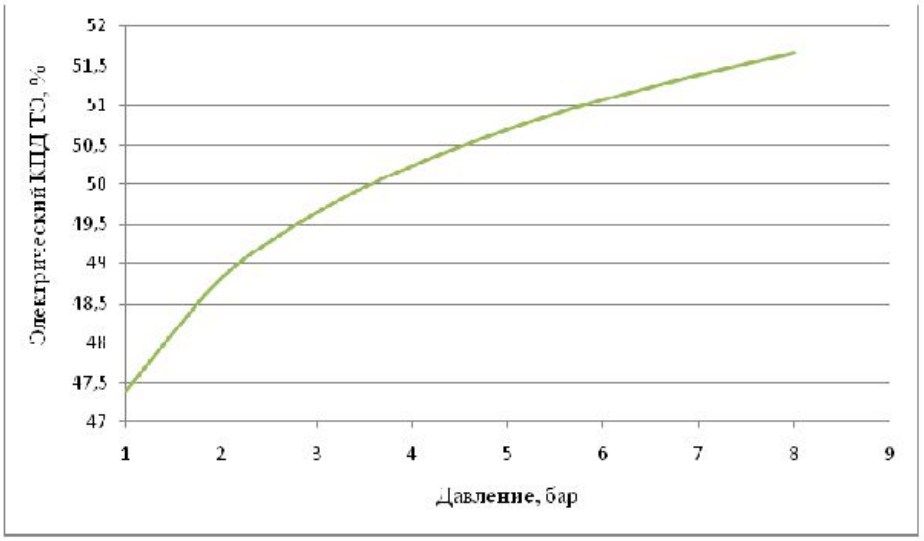


Рис. 14. Зависимость электрического КПД ТЭ от давления

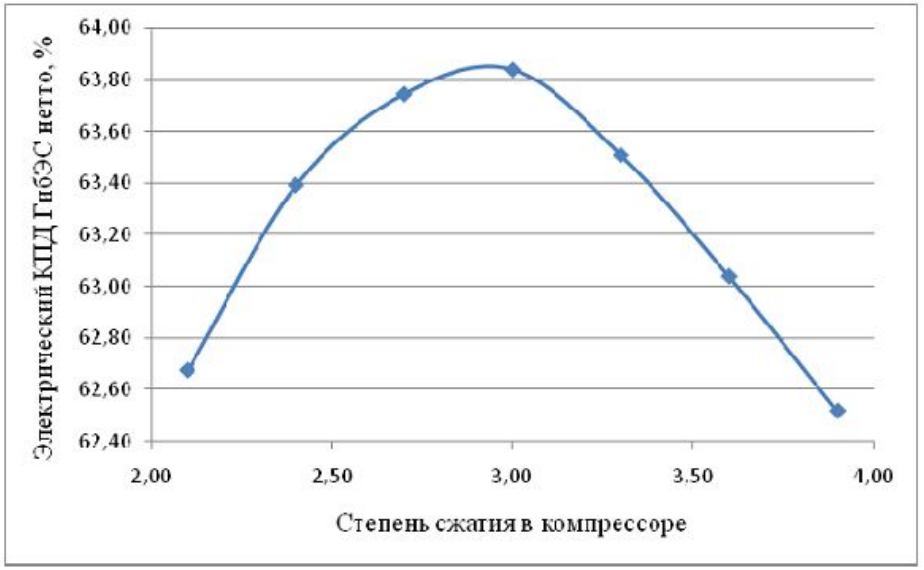


Рис. 15. Зависимость электрического КПД ГибЭС от степени сжатия в компрессоре ГТУ

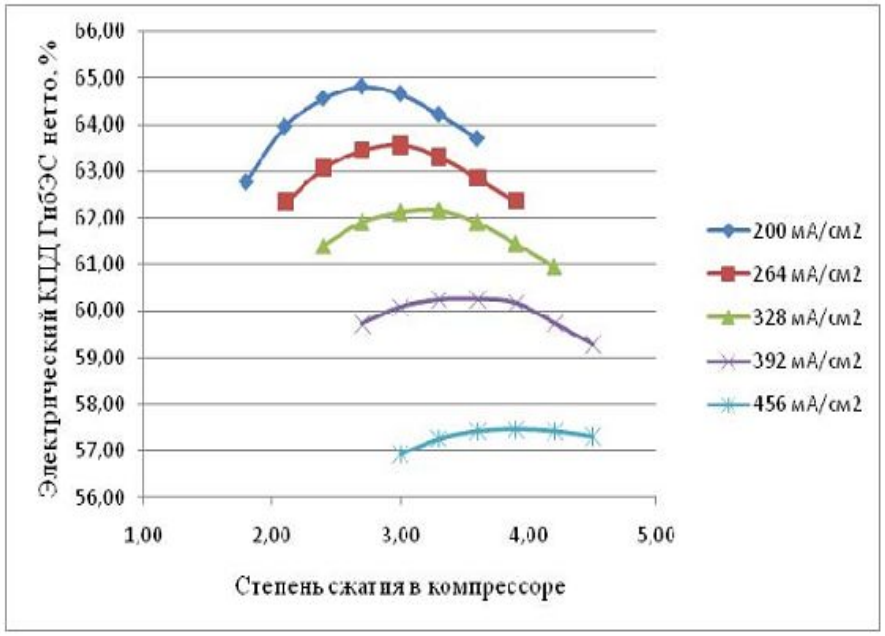


Рис. 16. Графики зависимости электрического КПД от степени сжатия в компрессоре ГТУ при различных плотностях тока ТЭ

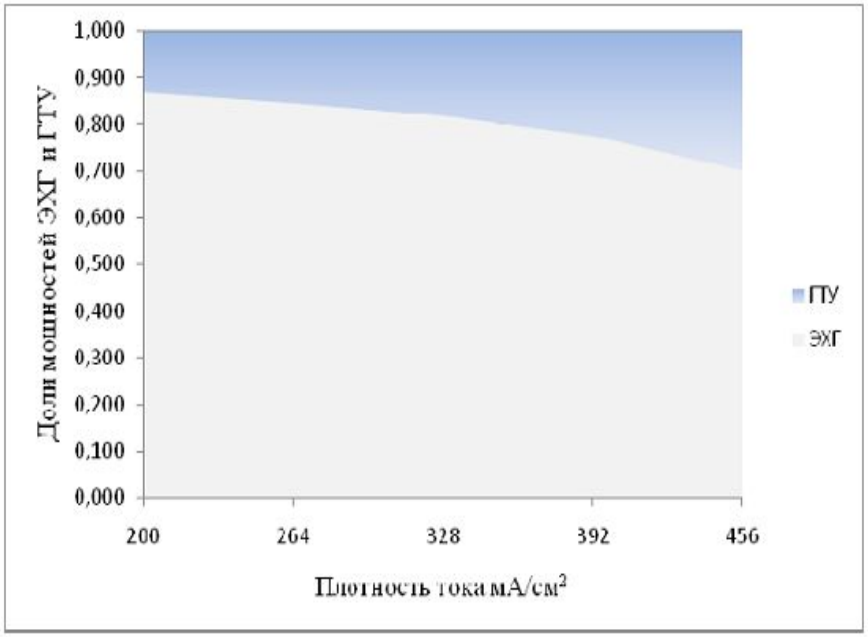


Рис. 17. Соотношение мощности ЭХГ и ГТУ при разных значениях плотности тока в ТЭ

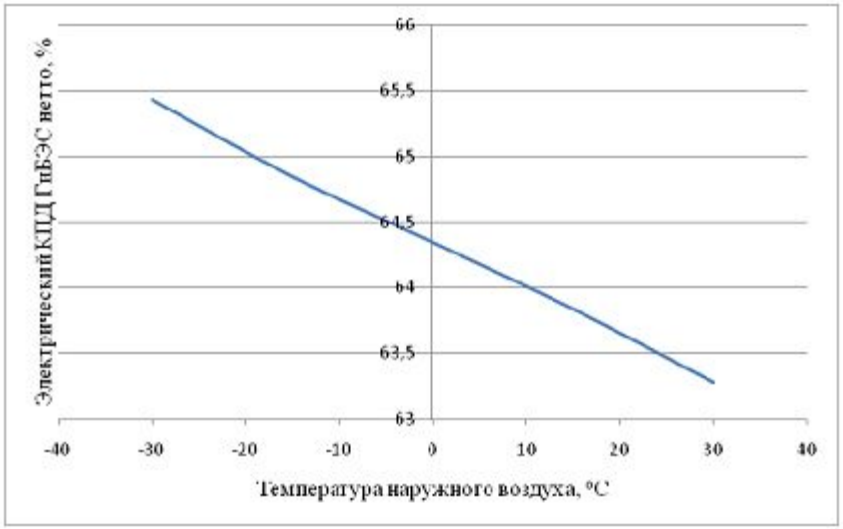


Рис. 23. Зависимость электрического КПД ГибЭС нетто от температуры наружного воздуха

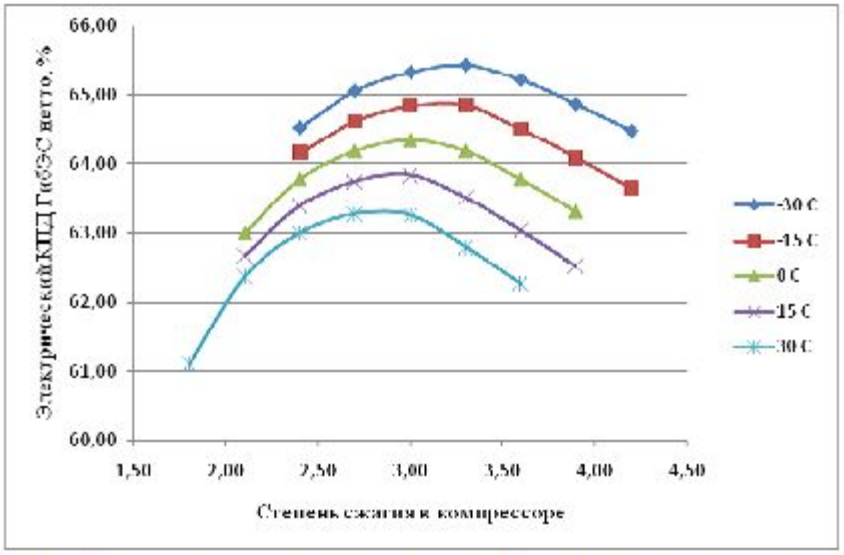


Рис. 24. Графики зависимости электрического КПД ГибЭС от степени сжатия в компрессоре ГТУ при различных значениях температуры наружного воздуха

Выявлена степень и характер влияния отдельных параметров схемы ГибЭС (плотность тока ТЭ, степень использования топлива в ТЭ, КПД компрессора и турбины, степень регенерации и температура наружного воздуха) на выбор оптимальной степени сжатия в компрессоре ГТУ. Установлено, что ключевыми показателями, наиболее сильно влияющими на тепловую экономичность ГибЭС, являются плотность тока и степень использования топлива в ТЭ. При этом для большинства условий оптимальное значение степени сжатия в компрессоре будет находиться в интервале 2,5-4,5.

Основные требования к ГТУ в составе ГибЭС

- Давление воздуха за компрессором характеризуется не высоким уровнем. При отсутствии дополнительного подвода топлива в камеру сгорания ГТУ с целью увеличения мощности, степень сжатия в компрессоре при большом диапазоне основных параметров тепловой схемы находится в интервале 2,5 – 5.

- Температура на конце газовой турбины должна иметь повышенное значение. В зависимости от схемы и условий работы температура на выхлопе ГТ составляет не ниже 600-750 °С.

- Тепловая схема ГибЭС подразумевают подогрев воздуха перед электрохимическим генератором. Этот подогрев выполняется посредствам рекуперации, где воздух подогревается от выхлопных газов турбины. Таким образом, ГТУ ГибЭС должна включать высокотемпературный рекуператор с температурой стенки до 750-800 °С.

- Объемное содержание топлива (непрореагировавшее в ТЭ) может находиться в диапазоне 15-50%. При дожигание такого топлива необходимы специальные камеры сгорания ГТУ, которые предназначены для сжигания низкокалорийного топлива.

- Учитывая показатели экономичности ГибЭС и стадию развития этой технологии, то можно предположить, что при дальнейшем развитии и реализации в ближайшие годы единичная мощность этих установок не будет превышать 20 МВт. Отсюда получается диапазон мощности ГТУ для ГибЭС в пределах 5 МВт.

Таблица 4

ГТУ российского производства

№	Тип ГТУ	Степень сжатия	Тнт, °С	Ткт, °С	Gв, кг/с	Nэл, кВт	КПД, %
1	ГТУ-1С (Салют)	~5	>1100	~700	~4,2	1000	42,0
2	ГТД ОР16 (Салют)	7	958	555	8,7	1800	26,0
3	ГТЭС-2,5 (Сатурн)	12,1	950	459	14,8	2500	26,0
4	ГТУ-2,5П (ПМЗ)	5,9	681	361	25,5	2500	21,1

Таблица 5

ГТУ иностранного производства

№	Тип ГТУ	Степень сжатия	$T_{нт}$, °С	$T_{кт}$, °С	$G_в$, кг/с	$N_{эл}$, кВт	КПД, %
1	*Turbec T100*	4	950	660	0,78	100	30,0
2	*Capstone 200C*	4	932	640	1,3	210	33,0
3	*P+W ST6L-721*	6,9	888	513	3,0	486	24,2
4	*Vericor VPS1*	10,6	937	496	3,5	514	18,7
5	***Capstone 1000C***	**4,5**	**890**	**592**	**6,6**	**1000**	**33,0**
6	*Turbomeca*	9,6	988	505	5,5	1086	26,0
7	*Solar Saturn 20-T1600*	6,6	899	512	6,5	1210	24,3
8	*Kawasaki GPB15*	9,4	991	520	8,0	1480	24,0
9	*P+W ST18A*	13,9	1093	532	7,8	1826	28,0
10	*Rolls-Royce 501-KB5S*	10	1057	560	15,2	3914	29,2
11	*Solar Mercury 50*	9,9	1093	595	17,6	4600	38,5
12	*Solar Centaur 50*	10,7	1054	517	19,1	4600	29,3

Таблица 6

Основные показатели *Capstone 1000C*

Показатель	Разм.	Значение
Мощность ГТУ	кВт	1000
Степень сжатия в компрессоре	-	4,5
Температура перед турбиной	°С	890
Температура за турбиной	°С	592
КПД компрессора (оценка)	%	83
КПД турбины (оценка)	%	84

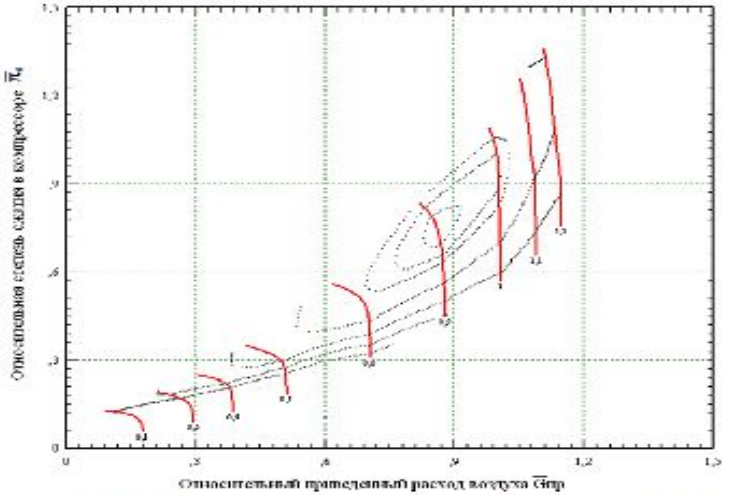


Рис. 25. Характеристика компрессора ГТУ *Capstone 1000C*

Таблица 7

Параметры ЭХГ

Показатель	Разм.	Значение
Активная площадь одного ТЭ	$м^2$	0,118
Количество ТЭ в батареи	шт.	576
Количество батарей ТЭ	шт.	225
Доля использования топлива в ТЭ	%	80
Максимальное изменение нагрузки ЭХГ	%	15

Основные технико-экономические показатели ГибЭС

Основные параметры	Разм.	Значение показателя
Электрическая мощность установки	кВт	7000
Число часов использования ном. мощности	ч	8000
Замена батарей топливных элементов	ч	40000
Годовой отпуск электроэнергии	тыс. кВт*ч	56000
Удельный расход условного топлива	г.у.т./кВт*ч	196
Уд. расход натурального топлива	$м^3$/кВт*ч	0,160
Годовой расход топлива	тыс. $м^3$/год	8978

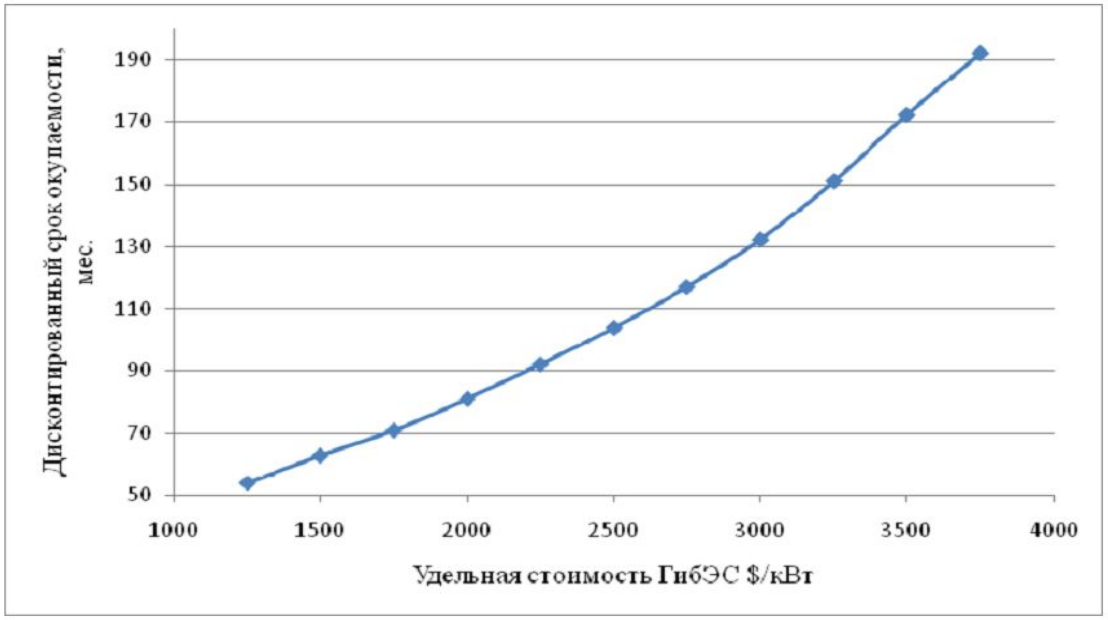


Рис. 28. График изменения удельной стоимости ГибЭС