



Информационно-
аналитический
бюллетень
ПАО «Мосэнерго»

ЭНЕРГЕТИКА ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



Выпуск № 3 / 2024

ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ
НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1
Э 40

Издание выходит с 2022 года

Главный редактор академик РАН **А.В. Клименко**

Э 40

Экология, энергетика, энергосбережение : бюллетень /
под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва :
ПАО «Мосэнерго», 2024. —

ISBN 978-5-383-01713-5

Вып. 3. Теплоутилизационные установки на базе органиче-
ского цикла Ренкина / [О.О. Мильман, В.Б. Перов]. — 2024. — 40 с.

ISBN 978-5-383-01716-6

Большой потенциал России в части использования вторичного тепла — основа для создания энергоустановок на базе органического цикла Ренкина (ОЦР) с низкокипящим рабочим телом (НРТ). В качестве НРТ можно использовать фреоны R134a, R245fa и углеводородные соединения: изопентан, бутан, толуол и др. При температуре источника тепла не выше 250—300 °С такой цикл имеет преимущество над классическим с водяным теплоносителем.

Греющей средой может служить термомасло от систем охлаждения, вода геотермальных полей, иногда — греющие газы от металлургических печей, двигателей, нефтехимических установок.

Описаны конструкции парогенераторов с нагревом НРТ в трубах и большом объеме, конденсационные установки с воздушным охлаждением. Уделено внимание турбинам для ОЦР, их опорам и уплотнениям. Главное преимущество установок ОЦР — компактность, отсутствие вакуумных зон, возможность работы при низких температурах окружающей среды, что важно для районов Сибири и Севера России.

Источник фото на обложке: <https://promvest.info/ru/novosti-kompaniy/turboden-postavit-kogeneratsionnuyu-stantsiyu-55-mvt-dlya-starwood/>

**УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1**

ISBN 978-5-383-01716-6 (вып. 3)
ISBN 978-5-383-01713-5

© ПАО «Мосэнерго», 2024
© Мильман О.О., Перов В.Б., 2024

ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Потенциал энергосбережения	3
1. Вторичные источники тепла. Типы теплоутилизационных установок	5
2. Особенности конструктивных и объемно-планировочных решений	25
3. Основные зарубежные производители комплексов на базе ОЦР-технологии.....	29
4. Экономические показатели ОЦР-блока	35
Заключение	37
Список использованной литературы	38

ОБ АВТОРАХ



МИЛЬМАН
Олег Ошеревич

лауреат Государственной премии РФ
и премии ОАО «Газпром» в области науки
и техники, заслуженный деятель науки
и техники РФ, доктор технических наук,
профессор



ПЕРОВ
Виктор Борисович

Генеральный директор
ЗАО НПВП «Турбокон»



Рис. 1. Теплоутилизационная установка мощностью 500 кВт на КС «Чаплыгин» ООО «Газпром трансгаз Москва» [4]

Ресурсосберегающая экологически чистая энергетика определена как приоритет научно-технологического развития России

Введение. Потенциал энергосбережения

В Указе Президента Российской Федерации «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» от 28.02.2024 № 145 [1] ресурсосберегающая экологически чистая энергетика определена как приоритет научно-технологического развития России, позволяющий получить значимые научные и научно-технические результаты, создать отечественные наукоемкие технологии.

В Указе Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» от 07.05.2024 № 309 [2] одной из задач национальной цели «Технологическое лидерство» является обеспечение технологической независимости по направлению «новые энергетические технологии».

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. [3] (утв. распоряжением Правительства от 9.06.2020 № 1523-р) отмечено, что в России потенциал энергосбережения достигает третьей части энергопотребления.

Потенциал энергосбережения России оценивается в 420—450 млн т у.т/год, из них на промышленность и ТЭК приходится 60—65 %. Значительную часть этого потенциала составляют вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) — побочные продукты основного и вспомогательного производства. В основном (до 60 %) ВЭР представлены в виде тепла. Его можно использовать, в частности, для выработки электроэнергии без затрат топлива. «Запасы» тепловых ВЭР огромны. Так, например, по нашим оценкам [4], только на базе тепловых выбросов газоперекачивающих агрегатов ПАО «Газпром» можно получить мощность до 5 млн кВт электроэнергии, что составляет более 2 % мощности всех электростанций России. Для этого необходимо ответить на очевидные вопросы: какая схема теплоутилизационного энергокомплекса и какой термодинамический цикл наиболее эффективны для реализации имеющегося потенциала? Серьезный шаг в этом направлении был сделан в 2016 году, когда в ПАО «Газпром» была принята программа строительства теплоутилизационных комплексов (ТУК) на базе компрессорных станций магистральных газопроводов.

Классический цикл Ренкина с водяным теплоносителем для выработки электроэнергии не исчерпал своих возможностей. Пример: энергоблок на компрессорной станции (КС) «Чаплыгин» (рис. 1) — это характерное решение для высокопотенциального источника тепла с водяным теплоносителем [4]. Для низкопотенциальных источников с температурой греющей среды до $t_{гр} = 250 \div 300$ °С преимущество имеет цикл на органическом теплоносителе (хладоны, кремнийорганика, углеводороды). Для северных районов водяной цикл вообще не желателен.

Вопросы использования тепловых ВЭР для производства электроэнергии — это и вопрос об уменьшении эмиссии CO_2 в окружающую среду. Теплоэнергетика и транспорт являются главными источниками этой эмиссии, и, следовательно, более полное использование топлива — также ресурс для сдерживания роста выбросов CO_2 .





https://kamenergo.ru/press-tsentr/news/?PAGEN_1=32

Потенциал энергосбережения России оценивается в 420—450 млн т у.т/год, из них на промышленность и ТЭК приходится 60—65 %

1 Вторичные источники тепла. Типы теплоутилизационных установок



Источники бросового тепла, которое может быть утилизировано, весьма разнообразны:

- промышленные предприятия различного профиля: химического, металлургического, пищевого и др.;
- установки по производству электроэнергии, тепла и механической энергии: газовые турбины, газопоршневые двигатели, промышленные котельные;
- системы отопления и кондиционирования: отопительные котельные, холодильное оборудование, термальные источники.

Утилизационные установки могут обеспечивать теплоснабжение, производство электроэнергии, производство холода (рис. 2). Имеют место и комбинации этих способов утилизации: когенерация — производство тепла и электроэнергии и тригенерация — совмещение всех трех видов утилизации.

Выбор типа утилизационных установок зависит от температурного уровня и объемов располагаемого бросового тепла.

Примерное предпочтение в выборе установок для использования температурного потенциала источника бросового тепла отражено в табл. 1. Здесь $t > 550^\circ\text{C}$ — металлургические печи, химические печи, химические технологии;

Таблица 1
Типы утилизационных установок для различных температур t утилизируемого тепла

Температура источника тепла	Тип оборудования			
	Э	Э + Т	Т	Т + К
$t > 550^\circ\text{C}$	+	—	—	—
$300 < t < 550^\circ\text{C}$	+	+	—	—
$120 < t < 300^\circ\text{C}$	—	+	+	+
$t < 120^\circ\text{C}$	—	—	+	+

Примечание. Э — производство электроэнергии; Т — теплоснабжение; К — кондиционирование, холод.

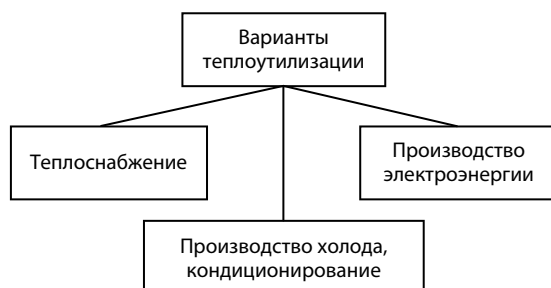


Рис. 2.
Типовые варианты теплоутилизации

$300 < t < 550$ °С — характерная температура выхлопов газотурбинных двигателей и газопоршневых агрегатов; $120 < t < 300$ °С — геотермальные ресурсы Камчатки и Курильских островов; $t < 120$ °С — геотермальные ресурсы Кавказа, котельные установки.

При $t > 550$ °С очевидным потребителем тепла является паровой котел-утилизатор на параметры $p = 3,5 \div 6,0$ МПа, $t = 435 \div 500$ °С с паровой турбиной среднего давления. Пример такой установки — утилизационный комплекс в ОАО «Куйбышевазот». Паровая противодавленческая турбина типа Р-6-3,4/0,5-1,0 мощностью 6 МВт работает на паре котла-утилизатора (рис. 3).

В диапазоне температур 300—550 °С также возможно производство электроэнергии в паросиловом цикле, как это сделано на КС «Чаплыгин» (см. рис. 1), но возможны и схемы теплоснабжения населенных пунктов и промпредприятий.

Греющая среда с температурой 120—300 °С также может быть использована для производства электроэнергии, но здесь паротурбинная установка на воде — плохой выбор, она по эффективности, надежности и габаритам существенно уступает установкам на базе органиче-



Рис. 3.
Утилизационный энергокомплекс с турбиной Р-6-3,4/0,5 в тепловом блоке комбината (ОАО «Куйбышевазот») [4]

ского цикла Ренкина (ОЦР) с использованием низкокипящих жидкостей.

И, наконец, если температура источника ниже 120 °С, он не перспективен для производства электроэнергии, но вполне удобен для теплоснабжения, кондиционирования и тепловых насосов различного назначения. Впрочем, есть установки, использующие геотермальную воду с $t = 90 \div 95$ °С для производства электроэнергии, но КПД их не превышает 4—5 %, а затраты на изготовление, монтаж и эксплуатацию велики.

Термодинамические основы реализации ОЦР-цикла

Рабочим телом для ОЦР являются низкокипящие жидкости — фреоны и углеводородные соединения.

На рис. 4 в t, S -диаграмме приведены в сравнении классический цикл Ренкина для воды и ОЦР для типового варианта фреона.

Принципиальное отличие фреонов от воды — наклон правой пограничной кривой насыщенного пара: для воды она имеет отрицательный наклон (уходит вправо вдоль оси S), для фреонов — положительный (уходит влево).

Первым следствием такого положения является тот факт, что в идеальном процессе расширения ($S = \text{const}$) от точки t_1 до t_2 в водяном цикле рабочее тело оказывается в зоне влажного пара со всеми проблемами влажнопаровых ступеней

турбины, в цикле на фреоне пар даже в конце своего расширения остается слегка перегретым, что исключает влажнопаровую эрозию.

Далее следует обратить внимание на точку начала кипения $t_{\text{кип}}$ водяного цикла. Начиная от $t_{\text{кип}}$ идет испарение и перегрев воды до температуры t_1 , и тепло этой части процесса — главная составляющая общего отвода тепла источника от точки t_3 до t_1 .

Одновременно с парообразованием и перегревом пара идет охлаждение греющей среды от $t_{\text{гр}1}$ до $t'_{\text{гр}}$. Разность $t'_{\text{гр}} - t_{\text{кип}}$ по определению должна быть положительной, она определяет расход рабочего тела

$$G_{\text{р.т}} = \frac{G_{\text{гр}}(t_{\text{гр}1} - t'_{\text{гр}})C_{\text{р.гр}}}{h_1 - h_{\text{кип}}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{гр}}$ и $C_{\text{р.гр}}$ — соответственно расход и теплоемкость греющей среды; $h_1 - h_{\text{кип}}$ — разность энтальпии водяного пара в точке t_1 и воды в точке насыщения $t_{\text{кип}}$.

Рассмотрим на конкретном примере, насколько полно используется потенциал располагаемого тепла. Положим, что в качестве греющей среды применяется газ с расходом $G_{\text{гр}} = 10$ кг/с, температурами $t_{\text{гр}1} = 300$ °С, $t'_{\text{гр}} = 250$ °С, его теплоемкость составляет $C_{\text{р.гр}} = 1,05$ кДж/(кг·°С). Если в цикле рабочим телом является вода, то при $p = 1,5$ МПа, $t_1 = 235$ °С, $t_{\text{кип}} = 198$ °С имеем $h_1 - h_{\text{кип}} = 2043$ кДж/кг, и расход рабочего тела (воды) в соответствии с (1) составит $G_{\text{р.т}} = 0,46$ кг/с.

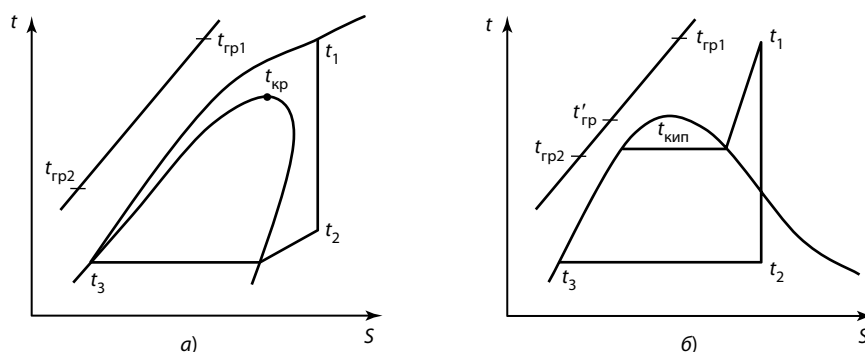


Рис. 4. Цикл Ренкина на t, S -диаграмме для органического рабочего тела (а) и воды (б)

Теперь можно оценить, как охладится греющая среда при нагреве рабочего тела от $t_3 = 30^\circ\text{C}$ ($h_3 = 126 \text{ кДж/кг}$) до $t_{\text{кип}} = 198^\circ\text{C}$ ($h_{\text{кип}} = 845 \text{ кДж/кг}$):

$$\Delta t_{\text{гр}} = \frac{G_{\text{р.т}}(h_{\text{кип}} - h_3)}{G_{\text{гр}} C_{\text{р.гр}}} = \frac{0,46(845 - 126)}{10 \cdot 1,05} = 32^\circ\text{C}. \quad (2)$$

То есть температура уходящих газов будет равна

$$t_{\text{yx}} = t'_{\text{гр}} - \Delta t_{\text{гр}} = 210 - 32 = 178^\circ\text{C}.$$

Таким образом, расход рабочего тела (воды) мал, и на участке $t_3 - t_{\text{кип}}$ не удастся охладить греющий теплоноситель до низкой температуры, т.е. его тепло не удастся утилизировать с должной глубиной.

В варианте с органическим рабочим телом термодинамический цикл лежит в закритической области (без кипения). При правильно выбранном давлении НРТ здесь нет ограничений, как в пароводяном цикле: $t'_{\text{гр}} - t_{\text{кип}} > 0$, и в итоге можно отвести тепло от греющей среды до любой технологически обоснованной температуры (например, при $t_3 = 30^\circ\text{C}$ до $t_{\text{гр2}} = 90 \div 100^\circ\text{C}$ без конденсации водяных паров на теплообменнике-парогенераторе). Таким образом, ОЦР обеспечивает более полное использование тепла греющей среды и при температуре $t_{\text{гр1}} < 250 \div 300^\circ\text{C}$ более эффективен в **части утилизации тепла греющей среды**, чем пароводяной цикл.

Рабочее тело для органического цикла Ренкина

Выбор низкокипящего рабочего тела (НРТ) — важный момент в процессе создания установки на базе ОЦР. Этому вопросу посвящен ряд публикаций [5—9] в отечественной и зарубежной литературе. К числу важнейших показателей, которые необходимо учитывать, следует отнести:

- эффективность установки;
- экологические показатели рабочего тела: воздействие на разрушение озонового слоя и парниковый эффект;

- пожаро- и взрывобезопасность установки;
- коррозионное и химическое взаимодействие с металлами и маслами;
- цена, доступность и условия утилизации;
- токсичность и воздействие на материалы и продукты в окружающей среде.

Одновременное удовлетворение всех этих показателей невозможно, поэтому выбор рабочего тела — всегда компромисс, решение принимает разработчик установки, работающей по ОЦР.

Одним из видов НРТ, которые в числе первых были применены и впоследствии получили широкое распространение, стали фреоны — галогенсодержащие производные насыщенных углеводородов (главным образом метана и этана). Инициатива использования фреонов в схемах энергоустановок в качестве рабочего тела принадлежит российским ученым С.С. Кутателадзе и М.Н. Лаврентьеву. В 1969 году на Паратунском геотермальном месторождении была запущена первая в мире энергоустановка мощностью 2,5 МВт. В качестве рабочего тела использован фреон R12 (химическая формула CCl_2F_2). Тепловая схема этой установки приведена на рис. 5.

Эта идея постепенно получила признание, и электростанции на фреоне появились в ряде стран как в геотермальном варианте, так и в утилизационном.

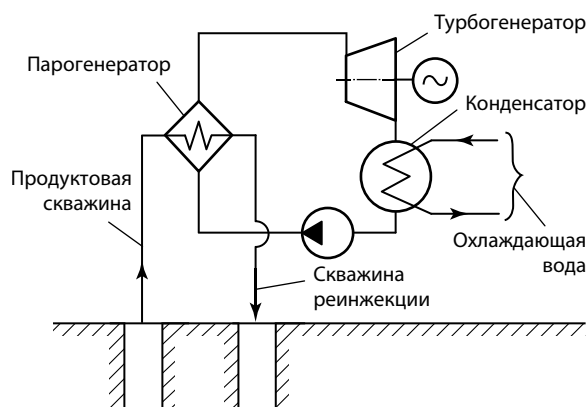


Рис. 5. Тепловая схема Паратунской ГеоЭС [10]

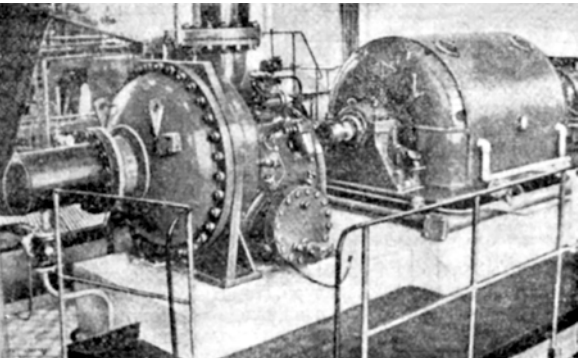


Рис. 6.
Турбоагрегат в машинном зале Паратунской ГеоЭС [10]

На рис. 6 представлена фотография этой установки в машинном зале электростанции.

На рис. 7 [11] представлено множество вариантов рабочих тел в разных странах применительно к геотермальным источникам: в конце 90-х — начале 2000-х годов эти установки из уникальных превратились в массовые.

Термодинамическая эффективность органического цикла зависит от свойств рабочего тела. Далее приводится перечень органических веществ [12], которые следует использовать, чтобы обеспечить наибольшую термодинамическую эффективность ОЦР-цикла в зависимости от температуры t источника тепла:

	$t, ^\circ\text{C}$
R-143a, R-32	47—92
R-22, R-290, R-134a, R-227ea, изопентан ...	92—122
R-152a, R-124, CF3I, R-236fa	122—147
R-600a, R-142b, R-236ea, изобутан, бутан.....	147—172
R-600, R-245fa, неопентан, R-245ca	172—192
R-123, R-236mfc, R-601a, R-601, R-141b...	192—227

Подчеркнем, что электрический КПД энергоблока помимо свойств рабочего тела зависит от характеристик оборудования, параметров термодинамического цикла.

В настоящее время в мире используются в основном рабочие тела с высоким потенциалом глобального потепления: изопентан, R-134a,

R-245fa. Идет поиск возможной замены их другими, более экологичными рабочими телами, такими как пропан и гидроолефины. Расчетные термодинамические исследования проводятся для определения влияния их использования на эффективность и конструкцию бинарной энергоустановки и затраты на ее эксплуатацию.

Основные производители энергоустановок с органическим циклом Ренкина: ORMAT (США — Израиль), Turboden (Италия), General Electric (США), Pratt and Whitney (Великобритания) и др. В табл. 2 приведены рабочие тела, которые используют эти фирмы, в основном фреоны R134a, R245fa; ORMAT-углеводороды.

В работе [14] даны рекомендации по использованию НРТ для установок на базе ORC в зависимости от температуры источника в диапазоне от 40 до 250 °С. Это позволяет сделать оптимальный выбор рабочего тела (табл. 3).

Оптимальное давление рабочего тела в испарителе должно превышать атмосферное, поскольку при меньших значениях требуется проведение дорогостоящих мероприятий по предотвраще-

Таблица 2
Некоторые сведения о рабочих телах, используемых различными компаниями при создании бинарных энергоустановок и проведении научных исследований [13]

Компания-производитель	Рабочее тело	Мощность БЭС
ORMAT	Углеводороды и их смеси	300 кВт — 25 МВт
Turboden	Solkatherm	1—7 МВт
Cryostar	R245fa, R134a	500 кВт—12 МВт
Pratt and Whitney	R245fa	280 кВт
General Electric	R245fa	125 кВт
Freepower	<i>n</i> -гексан	6, 60, 85, 120 кВт
Tri-O-Gen	Толуол	60—165 кВт
ОАО КТЗ	R134a	2,5 МВт

[illegible]

Рис. 7. Использование рабочих тел на геотермальных бинарных энергоблоках [11]:

знак «+» обозначает использование рабочих тел в циклах бинарных ГеоЭС; НД — нет данных

Таблица 3
Классификация НРТ по эффективности использования для установок на базе ОЦР при различных температурах источника

Температурный диапазон флюида	40—90 °С	90—120 °С	120—150 °С	150—170 °С	170—190 °С	190—250 °С
Рабочие тела	R134a R143a R32	R22 R290 R134a R227ea	R152a R124 R236fa CF3I	R600a R142b R236ea Бутан	R600 R245fa R245ca Неопентен	R123 R365mfc R-236mfc R601a R601 R141b

нию присоса воздуха, который может негативно влиять на работу оборудования [13]. При увеличении оптимального давления в испарителе мощность бинарной установки возрастает. Однако увеличение давления в испарителе выше 2,5—3,0 МПа нежелательно, так как обеспечение герметичности на органическом теплоносителе является более сложной задачей, чем при работе на водяном паре, кроме того, с ростом давления повышается металлоемкость оборудования. На рис. 8 показано оптимальное давление рабочего тела для установок при температуре греющей среды 85 °С.

Постановление Правительства РФ от 18.02.2022 № 206 [15] вводит ряд ограничений на использование фреонов. Все хладагенты разбиты на шесть списков — от А до F. Введены существенные ограничения на производство фреонов группы I и III из списка С (R21, R22, R141, R1428), разрешено использование их только в качестве сырья для производства других веществ.

Введено также регулирование контроля производства и использования фреонов группы F, весьма популярных в настоящее время: R134a и R245fa.

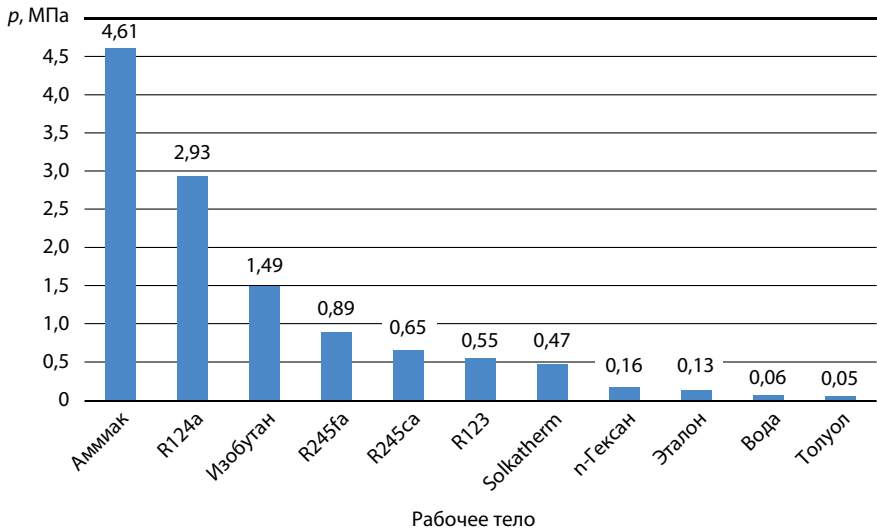


Рис. 8.
Оптимальное давление испарения для различных рабочих тел при температуре источника 85 °С [13]

Таблица 4
Перспективные НРТ [10]

Наименование, химическая формула	Точка кипения при $p = 1$ атм, °C	Критическая температура, °C	Критическое давление, бар	ODP (степень влияния на озоновый слой)	GWP (потенциал глобального потепления)	Категории безопасности
R717 (аммиак NH_3)	-33,33	132,3	113,33	0	1	B21
R744 (CO_2)	-78,4	30,38	73,773	0	2	A ₁
R290 (пропан C_3H_8)	-42,11	96,74	42,512	0	1	A ₃
R448A ($\text{CH}_2\text{F}_2\text{O}$)	-44,84	83,66	44,95	—	2	A ₁
R449A ($\text{CH}_2\text{F}_2\text{O}$)	-44,05	87,21	43,87	—	2	A ₁

В итоге вся линейка фреонов, допустимая к использованию, заметно сужается. Специалисты REF Engineering определили вещества, приоритетные для использования по экологическим показателям, взрывопожаробезопасности и стоимости. Помимо фреонов в качестве таких веществ рассматриваются аммиак NH_3 , диоксид углерода CO_2 , пропан C_3H_8 (табл. 4).

Одно из важнейших свойств — термостойкость рабочих тел. В этом плане пропан сохраняет стабильность состава до 360 °C, аммиак — до 1200 °C, разложение CO_2 при $T > 2700$ K, т.е. все эти продукты достаточно стойкие при $t < 250 \div 300$ °C.

Что касается популярных фреонов R134a и R245fa, производитель оценивает их термостойкость температурой 260 °C, а продукты их разложения как высокотоксичные.

Схема энергоустановки на базе ОЦР, выбор начальных параметров

Схема теплоутилизационной установки для выработки электроэнергии не имеет особых отличий от традиционной схемы паротурбинной установки, работающей на основе цикла Ренкина (рис. 9).

Тепло от источника поступает в парогенератор, пар рабочего тела подается в фреоновую турбину с электрогенератором, отработавший пар отводится в конденсатор (в схеме — воздухоохлаждаемый). Конденсатно-питательный насос откачивает конденсат фреона из конденсатосборника на вход в парогенератор. В общем случае в схеме может быть рекуператор для подогрева конденсата на входе в парогенератор и система удаления неконденсирующихся газов.

Для обеспечения маневренности энергоблока при изменении электрической нагрузки генератора или теплового потока в парогенераторе в схеме предусмотрена быстродействующая редуционно-охлаждающая (или просто редуционная) установка (БРОУ) для сброса избытка пара в конденсатор при разгрузке генератора, а также для безопасного пуска и останова энергоблока.

На примере одного из рабочих тел — изопентана — рассмотрим влияние начальных параметров — давления и температуры перед турбиной на эффективность теплоутилизационных установок. Такие же задачи решаются и относительно других рабочих тел для таких установок, как на рис. 9.

Максимальная начальная температура рабочего тела на входе в турбину ограничена его

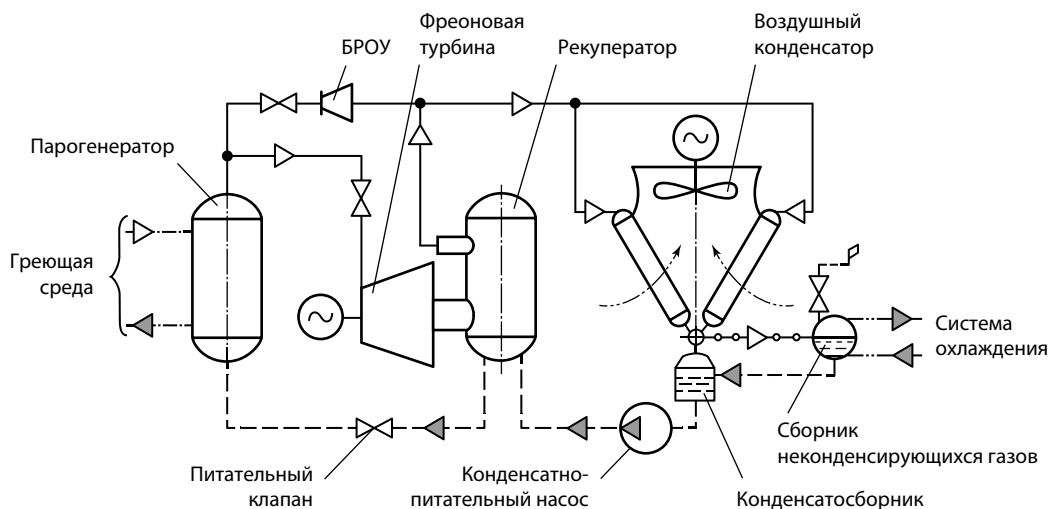


Рис. 9.

Схема теплоутилизационной установки для производства электроэнергии

термостойкостью [16, 17]. Превышение пределов термостойкости приводит к необходимости удаления продуктов разложения НРТ и подпитке для компенсации его убыли, что увеличивает эксплуатационные затраты, связанные с хранением требуемых запасов рабочего тела и их своевременным пополнением. Таким образом, желание улучшить показатели цикла путем повышения начальной температуры рабочего тела вступает в некоторое противоречие с ростом эксплуатационных затрат, и оптимум по температуре следует искать с учетом совместного влияния обоих факторов. В настоящее время изопентан используется при начальных температурах, не превышающих 220 °С.

Максимальное значение начального давления при выбранной температуре ограничивается условием отсутствия жидкой фазы на всех стадиях расширения пара в турбине. Однако начальное давление изопентана, как показали расчеты, неоднозначно влияет на показатели цикла.

Зависимости КПД установки ОЦР от начальных температуры и давления изопентана, построенные по результатам тепловых расчетов, выполненных при одних и тех же показателях эффективности составных частей энергоблока, приведены на рис. 10.

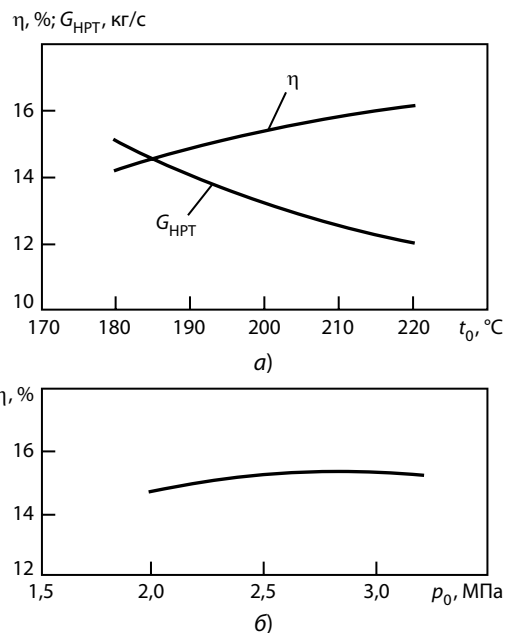


Рис. 10.

Влияние начальных температуры и давления на энергоэффективность установки ОЦР мощностью 1 МВт, работающей на изопентане [18]:

а — зависимость КПД (η) и расхода изопентана $G_{НРТ}$ от начальной температуры установки при $p_0 = 2,8$ МПа; б — зависимость КПД от начального давления при $t_0 = 200$ °С

Изменение начального давления изопентана при его фиксированной температуре 200 °С от 2,5 до 3,2 МПа незначительно сказывается на КПД установки ОЦР. Это означает, что снижение мощности на 20 % от номинальной можно осуществить дросселированием при практически неизменном КПД. Оптимальное значение начального давления при начальной температуре изопентана 200 °С составило 2,8 МПа. Повышение же температуры при неизменном оптимальном давлении сопровождается заметным ростом электрического КПД (нетто).

Следует, однако, отметить, что увеличение начального давления изопентана при его неизменном массовом расходе приводит к существенному снижению объемных расходов в первых ступенях турбины, уменьшению размеров лопаток, а при низких мощностях — и к необходимости парциального подвода пара изопентана в турбину, что, в свою очередь, снижает КПД первых ступеней и турбины в целом. Особенно заметно это проявляется в низкооборотной турбине относительно невысокой мощности.

Характер зависимости эффективности ОЦР-установки на изопентане от его температуры и давления оказывается примерно таким же и для других НРТ (фреонов и углеводородов).

Особенности конструкции основных элементов ОЦР-установки

Теплоутилизатор. Как отмечалось выше, многие НРТ, прежде всего фреоны, имеют существенные ограничения по термостойкости. В тех случаях, когда греющая среда имеет температуру более высокую, чем допустимая по условиям термостойкости, между греющей средой и НРТ используется промежуточный термомасляный контур (рис. 11).

Для температур меньше 200 °С возможно применение минеральных масел — продуктов нефтяной переработки. Для более высоких температур используют синтетические масла. Важнейшие показатели для них:

- максимально допустимые температуры;
- кинематическая вязкость;
- теплопроводность.

В табл. 5 приведены свойства отечественных и зарубежных синтетических масел. В России производятся масла типа термолан, вполне конкурентоспособные для реализации ОЦР [19].

Что же касается конструкции масляного котла, то она ничем не отличается от конструкции

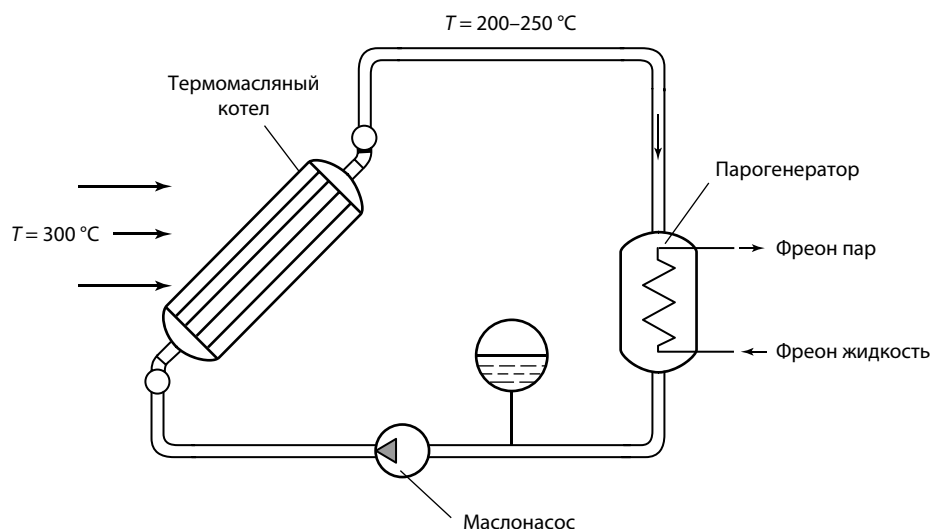


Рис. 11.
Термомасляный контур с котлом и парогенератором

Таблица 5
Сравнительная таблица свойств синтетических масел [19]

Торговое название	Место производства	Диапазон рабочих температур, °С	Максимально допустимая температура на пленке, °С	Кинематическая вязкость при 300 °С, сСт	Температура, °С				Теплоемкость, кДж/(кг · °С)	Теплопроводность при 300 °С, Вт/(м · °С)	Стоимость за 1 кг с НДС, руб.
					кипения при 1 атм	затвердевания	вспышки	самовоспламенения			
Therminol 59	США — Англия	–45...315	340	0,55	289	–68	138	404	2,62	0,091	216
Therminol 66	США — Англия	–24...345	375	0,59	359	–32	170	399	2,569	0,095	368
Dowtherm Q	США	–35...330	360	0,19	267	–35	120	412	2,502	0,084	290
ТЛВ-330	Россия, г. Бийск	–45...350	350	0,2	355	–45	195	400	2,860	0,071	115
Marlotherm-LH	Германия	–30...380	380	0,3	280	–30	130	450	2,55	0,057	360
Marlotherm-SH	Германия	–5...380	380	0,45	390	–34	200	450	2,59	0,054	360
Термолан N	Россия, НПК «Полиэстр»	–40...330	360	0,49	330	–50	190	400	2,54	0,071	200
Термолан 360	Россия, НПК «Полиэстр»	–32...360	360	0,49	360	–32	190	400	2,64	0,096	—
Термолан SILICA S4	Россия, НПК «Полиэстр»	–50...360	360	0,56	—	–60	305	385	2,07	0,081	—

выпускаемых в большом количестве котлов для сжигания бытовых отходов, щепы, древесных отходов и пр.

В этих котлах использованы теплообменные трубы сравнительно большого диаметра [номинальный размер (условный проход D_y) $DN > 50$]. Для утилизации тепла выхлопных газов ГТУ, водогрейных котлов, газопоршневых двигателей целесообразно разработать более компактные установки с использованием труб с приварным оребрением, что широко применяется в технологиях ряда фирм России (АО «Теплохим», АО «Борхиммаш», ПАО ТКЗ «Красный котельщик», НПФ «Энтехмаш» и др.). В таком исполнении тепло-

обменник-маслонагреватель включают в тракт выхлопных газов двигателя по такой же схеме, как на рис. 12, и нагреватель масла представляет собой кожухотрубный аппарат, где горячие газы омывают 6—10 рядов труб с приварным оребрением. В трубах по двухходовой схеме движется термомасло, которое далее подается в парогенератор ОЦР.

При температурах греющей среды выше 300 °С преимущество перейдет к циклам на базе водяного теплоносителя.

При невысокой температуре греющего теплоносителя возможна схема прямого нагрева и парообразования фреона в цикле ОЦР (рис. 13).

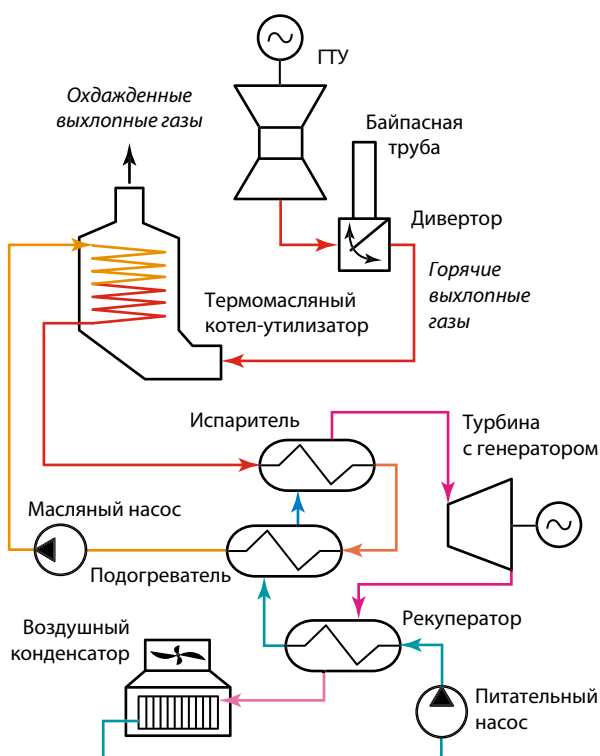


Рис. 12.
Схема утилизационной энергоустановки с термомасляным котлом

Источник: <https://www.turbinst.ru/page,2,49625-cikl-renkina-na-nrt-nizkokipyaschee-rabochee-telo.html>

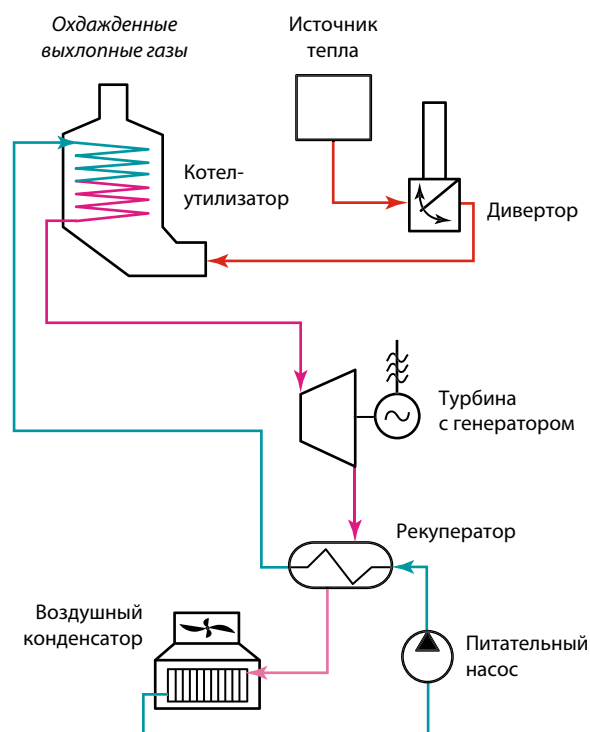


Рис. 13.
Схема утилизационной энергоустановки с нагревом фреона выхлопными газами [20]

На рис. 14 показан термомасляный утилизационный котел с нижним подводом выхлопных газов. Утилизационный термомасляный котел похож на водогрейный и представляет собой кожухотрубный теплообменник, в трубах которого циркулирует масло. Для большей маневренности установки в них предусматривают шиберы для перепуска газа в дымную трубу или на утилизацию.

На рис. 15 приведены конструкции таких шиберов. Поскольку речь идет о больших объемах расхода греющего газа, то и размеры шиберов весьма значительны. По конструктивному исполнению подъемные шиберы проще поворотных, но функционально они более ограничены: перекрывают газоход, тогда как поворотные перепускают греющие газы на выхлоп или на котел-утилизатор.

Схема с термомасляным котлом позволяет работать типоряд утилизационных установок, независимых от температуры бросового тепла.

Парогенератор. Назначение парогенератора — производить насыщенный или слабо перегретый пар НРТ за счет тепла греющей среды (термомасла, горячей термальной воды и пр.).

Основной тип конструкций парогенераторов для ОЦР — кожухотрубные аппараты. Варианты конструкций таких парогенераторов, использующих, например, фреон, приведены на рис. 16.

Все эти типы парогенераторов ориентированы на жидкий греющий теплоноситель: термомасло или воду, а типы на рис. 16, б, в могут использоваться в качестве греющей среды конденсирующийся пар.

Рис. 14.
Термомасляный котел-утилизатор Cannon Bono Energia (Италия)

Источник: <https://cannon.ru/kotly-utilizatory>



Рис. 15.
Газоплотный шибер компании Raumag Janich [20]:

a — подъемный; *б* — поворотный

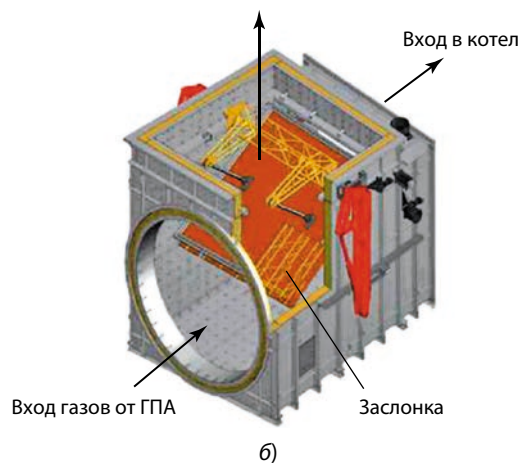
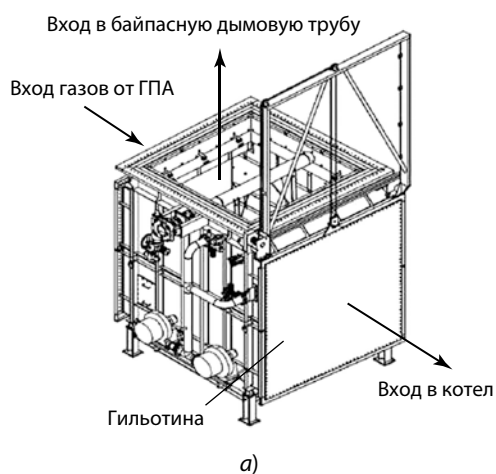


Рис. 16.
Типы фреоновых парогенераторов:

a — горизонтальный, фреон в межтрубном пространстве; *б* — горизонтальный, фреон внутри труб; *в* — вертикальный, фреон внутри труб; *г* — горизонтальный оросительный, фреон в межтрубном пространстве

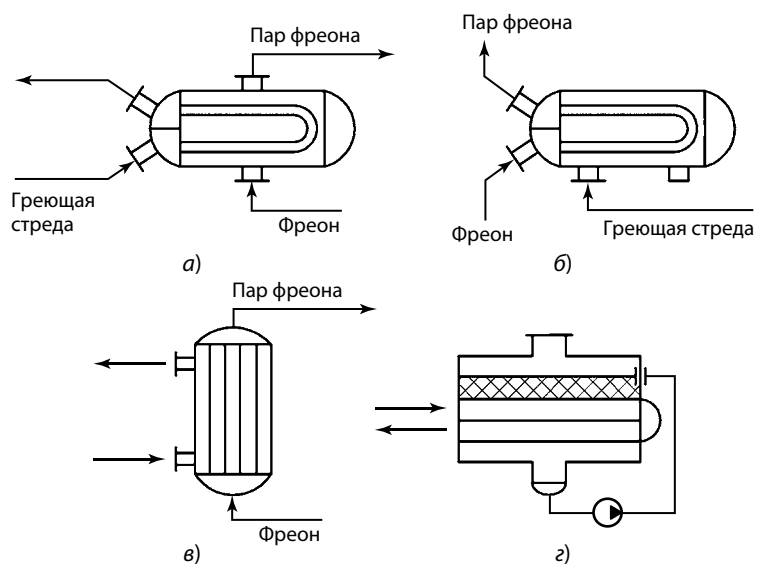




Рис. 17.
ОЦР-установка фирмы Siemens

Источник: <https://www.shapecut.com.au/reducing-the-environment-impact-of-steel-mills/>

При выборе типа парогенератора необходимо учитывать следующие факторы:

- рабочее давление фреона;
- рабочее давление греющей среды;
- цена и необходимое количество фреона для заполнения контура ОЦР;
- риск потери плотности и утечки фреона;
- конструктивно-компоновочные решения по установке в целом, включая степень заводской готовности и транспортабельность.

Очевидно, что варианты с фреоном в межтрубном пространстве потребуют большие объемы рабочего тела, что критично для дорогостоящих фреонов R245fa, R134a и куда менее существенно для сравнительно дешевых чисто углеводородных рабочих тел: изобутана, н-пентана, пропана.

На рис. 17 приведен внешний вид энергоблока мощностью 400 кВт фирмы Siemens.

На переднем плане горизонтальный парогенератор с кипением НРТ в объеме парогенератора.

Оптимальный вариант использования парогенератора предполагает небольшой перегрев пара фреона (5—20 °С), что гарантированно исключает наличие жидкой фазы в трубопроводе к турбине.

На рис. 18 показано разделение зон поверхности парогенератора: экономайзера, испарителя и пароперегревателя, — для турбины 2,5 МВт Паратунской ГеоЭС, а на рис. 19 — расположение этих зон в корпусе горизонтального парогенератора для НРТ R134a.

В ряде случаев зону экономайзера, испарителя и пароперегревателя выполняют в виде отдельных аппаратов, технологически связанных трубопроводами греющей среды и фреона. Вариант компоновки такого парогенератора для утилизационного теплоэнергетического комплекса мощностью 1000 кВт (УТЭК-1000, заказчик ОАО «Силловые машины») приведен на рис. 20 для НРТ R245fa.

Турбины. Выбор начальных параметров должен осуществляться, в частности, с учетом конструктивно-компоновочной схемы турбины. В этом контексте рассмотрим следующие варианты турбин на изопентане:

- низкооборотная с прямым приводом генератора стандартной частоты вращения 3000 мин^{-1} ;
- высокооборотная с приводом через редуктор генератора стандартной частоты вращения 3000 мин^{-1} ;
- высокооборотная с прямым приводом высокооборотного генератора и последующим преобразованием частоты тока к стандартной (50 Гц).

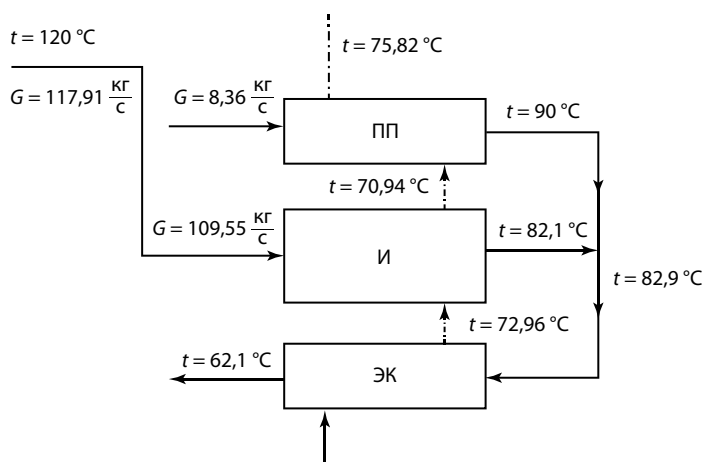


Рис. 18.
Распределение расходов и температур по тракту
ЭК — И — ПП:
ЭК — экономайзер; И — испаритель; ПП — паропере-
греватель

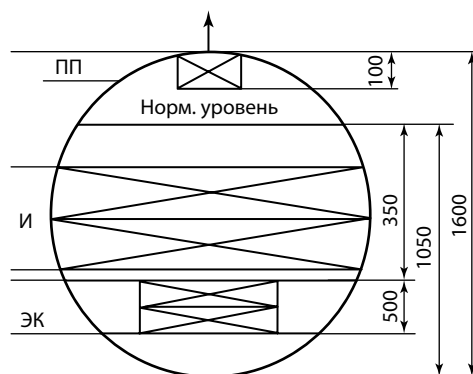


Рис. 19.
Расположение зон экономайзе-
ра — испарителя — пароперегре-
вателя

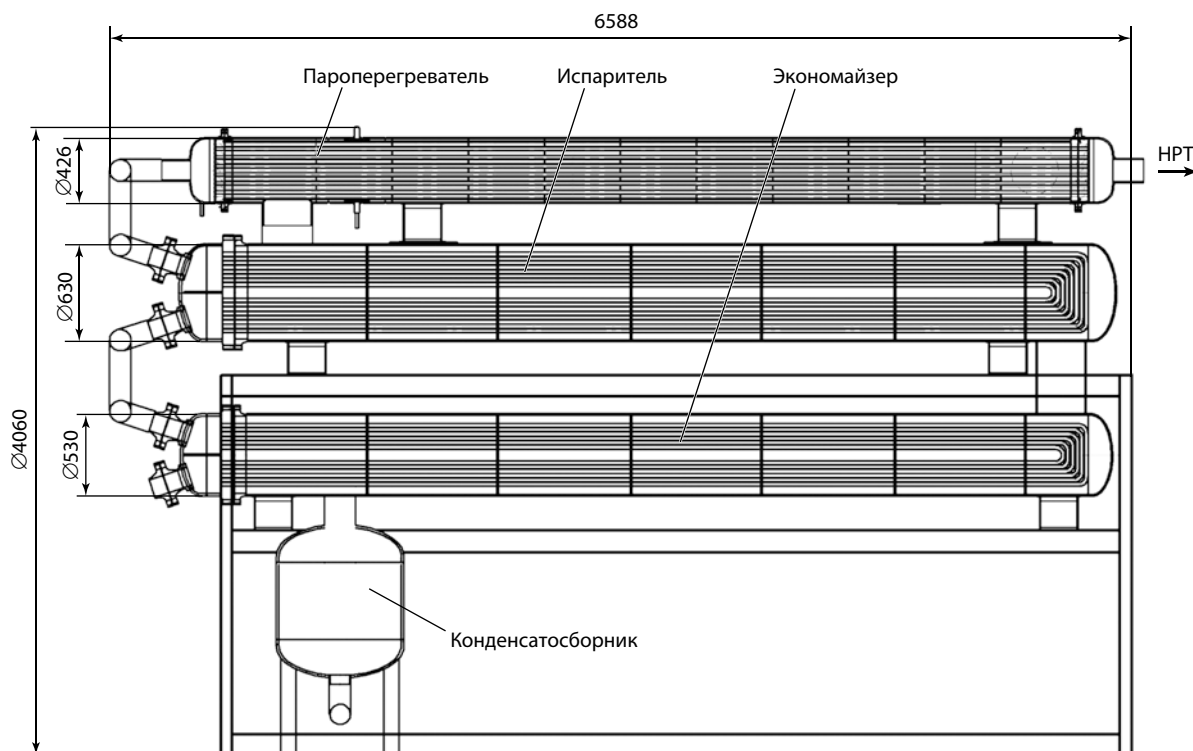


Рис. 20.
Разделение горизонтального парогенератора на три зоны

Таблица 6
Сравнительные характеристики воздуха, водяного пара и изопентана
(давление 1,0 МПа, температура 200 °С)

Параметр	Рабочее тело		
	Воздух	Водяной пар	Изопентан (пар)
Плотность, кг/м ³	7,33	4,85	20,40
Скорость звука, м/с	437	517	218
Располагаемый теплоперепад при снижении давления до 0,5 МПа, кДж/кг	86	133	34
Число Маха при изоэнтропическом расширении до 0,5 МПа	1,05	1,13	1,17

При выборе того или иного варианта турбины необходимо учитывать, что теплофизические свойства НРТ могут существенно отличаться от свойств «привычных» рабочих тел, таких как воздух и водяной пар. Применительно к изопентану это проиллюстрировано в табл. 6.

Из приведенных в этой таблице данных следует, что если ставить задачу ограничения скоростей в лопаточных венцах дозвуковым уровнем, то число ступеней турбины, работающей на изопентане, должно быть не меньшим, чем, например, у паровой турбины при той же степени расширения. В связи с малой работой расширения окружные скорости и диаметральные размеры изопентановой турбины будут меньше, чем размеры паровой. Для выработки одинаковой мощности массовый расход пара изопентановой турбины должен быть в 4 раза выше, чем паровой, при этом объемные расходы у таких турбин различаются несущественно, однако площади проходных сечений межлопаточных каналов соплового аппарата (СА) первой ступени изопентановой турбины при прочих равных факторах будут больше в 2 раза, чем у паровой турбины той же мощности.

Плотность жидкой фазы изопентана в 1,6 раза меньше, чем конденсата водяного пара (610 и 992 кг/м³ соответственно). Это в сочетании с увеличенными массовыми расходами приводит к относительно высоким объемным расходам конденсата изопентана и, соответственно, к повышенным затратам мощности на привод конденсатно-питательного насоса, который вме-

сто обычных 2—3 % у паровых турбин потребляет 10 % и более мощности у турбин установок ОЦР. Следует отметить, что повышенные затраты мощности на привод насосов наблюдаются при использовании практически всех органических рабочих тел.

Далее будут рассматриваться характеристики лопаточного аппарата установки номинальной мощностью нетто 1 МВт [18].

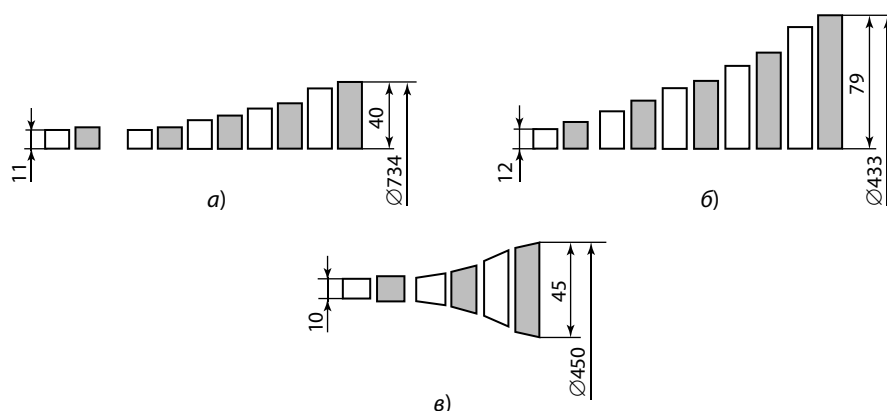
На рис. 21 в качестве примера приведены три варианта исполнения проточной части турбины для ОЦР:

- с прямым приводом генератора на $n = 3000$ об/мин;
- высокооборотной $n = 6000$ об/мин с редуктором;
- высокооборотной $n = 8400$ об/мин с уменьшенным числом ступеней.

Чем ниже температура теплоносителя, тем меньше теплоперепад на турбине и меньше количество ступеней.

На рис. 22 приведены фотографии осевой и центростремительной ступеней.

Центростремительная ступень уступает осевому варианту в экономичности, но выигрывает в габаритах, может быть выполнена как часть ротора генератора.

**Рис. 21.**

Проточная часть турбины для ОЦР-установки мощностью 1 МВт на изопентане [18]:

частота вращения ротора, об/мин: а — 3000; б — 6000; в — 8400; светлые четырехугольники — направляющий аппарат, темные — рабочие лопатки

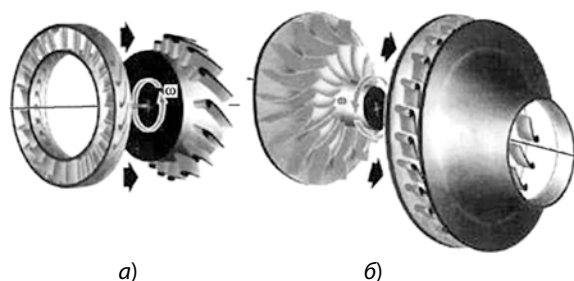
Основным достоинством турбин, работающих на НРТ, является компактность и отсутствие влажнопаровой эрозии во всех режимах эксплуатации.

Опоры и уплотнения турбины. Традиционно энергетические паровые и газовые турбины, рассчитанные на большой ресурс работы, имеют опоры скольжения с принудительной масляной смазкой. Как правило, такая маслосистема имеет развитую структуру, включающую масляные насосы с нагнетающими и откачивающими секциями, маслобаки, маслоохладители, фильтры и другие агрегаты.

Уплотнительная система турбины призвана не только минимизировать утечки рабочего тела из замкнутого контура, но и предотвратить проникновение в него масла, а в масляный контур — водяного пара (в паровой турбине) или горячих продуктов сгорания (в газовой турбине).

Уплотнения бесконтактного типа снижают, но не предотвращают полностью утечки, а уплотнения контактного типа, изначально более эффективные, со временем утрачивают свою работоспособность вследствие износа.

Для установок ОЦР проблема уплотнения турбины имеет не менее важное значение. Она усугубляется тем обстоятельством, что цены на органические рабочие тела, потенциально при-

**Рис. 22.**

Варианты ступеней для установок ОЦР в зоне небольших теплоперепадов [18]:

ступени: а — осевая; б — центробежная

влекательные для использования в утилизационных теплоэнергетических установках, различаются в десятки раз, и, по оценкам, для некоторых из них даже начальная заправка может составлять значительную долю стоимости всего комплекса. Необходимость подпитки для бесперебойной эксплуатации установок заставляет иметь в наличии требуемый для расхода и пополнения в процессе эксплуатации запас, что не может не отразиться на повышении стоимости всего жизненного цикла установки. Кроме того, для устранения негативного влияния на окружающую среду и предотвращения опасности пожара, если произошла утечка рабочего тела, горючий

фреон должен собираться и направляться в систему утилизации.

Фактически в узле сопряжения вращающегося вала и неподвижного корпуса можно лишь в той или иной мере снизить утечки, но не устранить их полностью. Идеальной в этом отношении является организация полностью герметичного замкнутого контура. Такая конструкция предполагает следующее:

- турбина и генератор заключены в герметичный контейнер;
- опоры турбины и генератора газостатические, газодинамические или на магнитном подвесе, отвод тепла, выделяющегося в опорах и генераторе, осуществляется рабочим телом замкнутого контура;
- уплотнительная система выполняет только функцию минимизации паразитной протечки из областей высокого давления в области низкого давления, протечки внутри герметичного контейнера не выводят рабочее тело из замкнутого контура;
- конденсатно-питательный насос также помещается в герметичный контур вместе с электроприводом, либо его привод осуществляется извне с помощью магнитной муфты.

Технические решения по охлаждению генератора рабочим телом замкнутого контура, по опорной системе и приводу насосов в герметичном контейнере защищены патентами НППВ «Турбокон». Они относятся ко всем типам НРТ (фреоны, изопентан, аммиак и др.), которые предполагается использовать в полностью герметичном контуре.

Конденсаторы. В энергоустановках по циклу ОЦР так же, как и в пароводяном варианте, присутствует конденсатор пара фреона.

Конденсатор и парогенератор — два крупных теплообменных аппарата, определяющих пространственно-компоновочные решения в энергоблоке на органическом цикле Ренкина.

Выбор типа конденсатора — это вопрос наличия теплоносителя для отвода тепла отрабо-

Таблица 7
Сравнительные характеристики пароводяного и фреонового конденсатора при температуре конденсации $t_k = 40^\circ\text{C}$

Параметр	Вода	R134a
Давление конденсации, бар	0,07	1,41
Теплота фазового перехода, кДж/кг	2406	355

тавшего пара НРТ: воздуха или воды. Если имеется вода приемлемой температуры (до $25\text{—}30^\circ\text{C}$), то целесообразно использовать водоохлаждаемый конденсатор: более дешевый и сравнительно компактный. При отсутствии воды в качестве охлаждающего агента выступает воздух. Габариты и цена воздухоохлаждаемого конденсатора значительно больше, чем водоохлаждаемого. При этом следует отметить два существенных отличия конденсатора ОЦР-установки от пароводяного, которые отображены в табл. 7 на примере фреона R134a.

Из-за избыточного давления в конденсаторе и малой теплоты фазового перехода, во фреоном конденсаторе нет присосов воздуха (давление выше атмосферного), а расход охлаждающей воды на 1 кг/с рабочего тела (кратность охлаждения) в $6\text{—}7$ раз меньше.

Несмотря на отсутствие присосов воздуха, во фреоном конденсаторе необходимо предусматривать возможность периодической продувки остаточных газов из цикла ОЦР, а также продуктов разложения фреона.

Габаритный чертеж водоохлаждаемого конденсатора для установки мощностью $2,5\text{ МВт}$ на фреоне R134a приведен на рис. 23. Конденсатор имеет четыре хода по охлаждающей воде и патрубков $DN = 600$ для подвода отработавшего пара фреона R134a. Трубный пучок набран из латунных труб Л072 диаметром

В практике создания установок на ОЦР широко применяют воздушные конденсаторы, когда отработавший пар фреона конденсируется внутри горизонтальных или наклонных труб. Такой вариант конденсатора часто используют некоторые

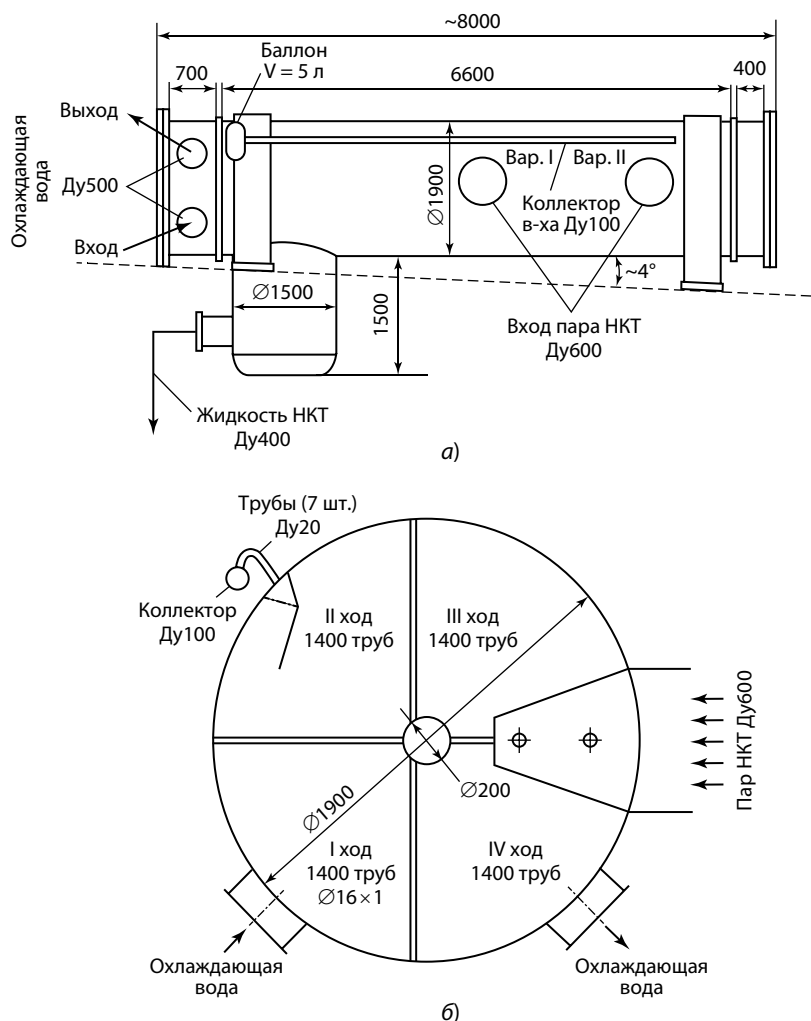


Рис. 23.
Компоновка конденсатора

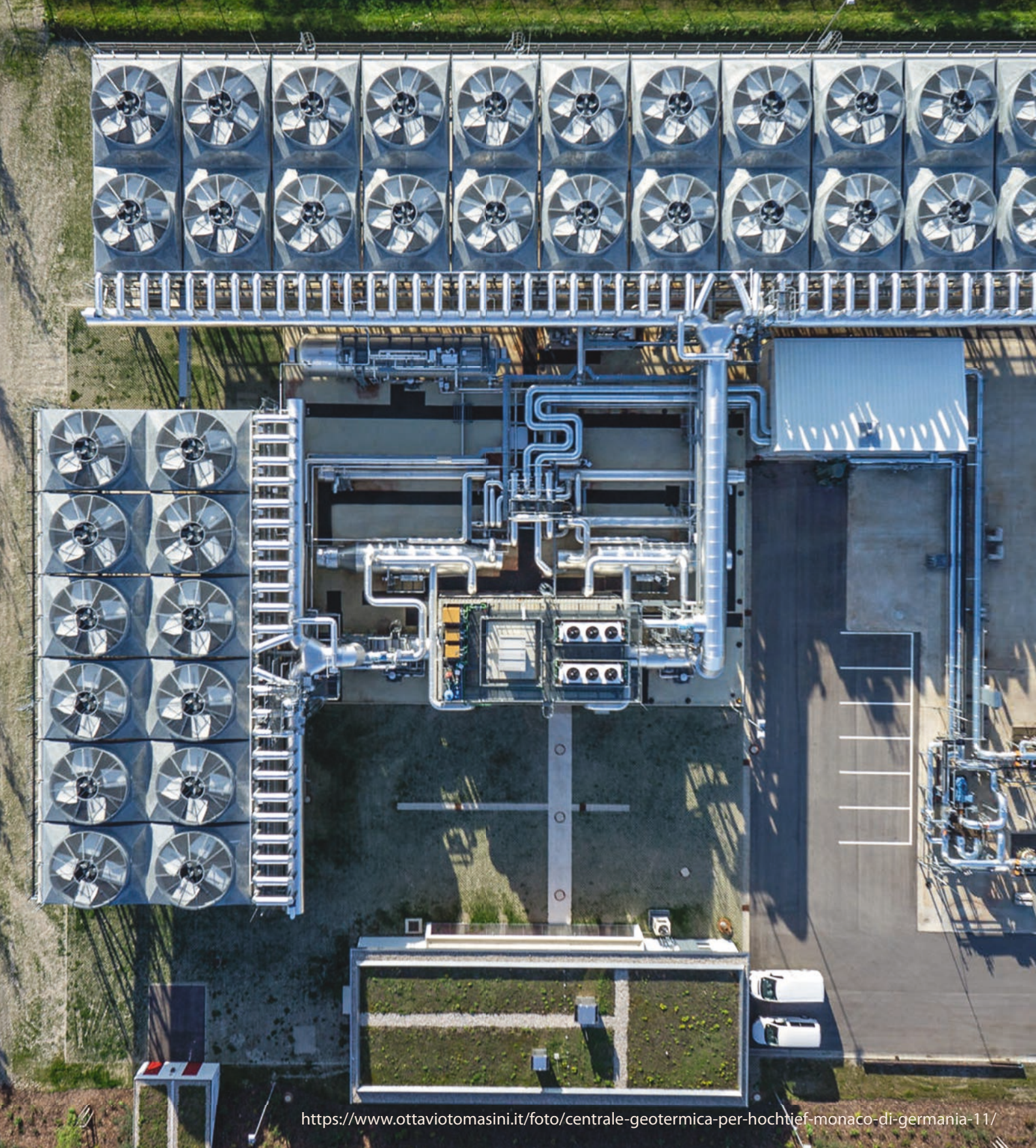
Рис. 24.
Энергокомплекс с воздушным конденсатором фирмы ORMAT

Источник: <https://www.ormat.com/en/company/news/view/?ContentID=497>



фирмы для поставок комплектов ОЦР в открытой компоновке в страны с теплым климатом и ограниченными водными ресурсами.

Вариант компоновки энергокомплекса с воздушным конденсатором фирмы ORMAT приведен на рис. 24.



Для удобства монтажа утилизационный
ОЦР-комплекс должен изготавливаться блоками
максимальной заводской готовности в габаритах
стандартного транспортного оборудования

2 Особенности конструктивных и объемно-планировочных решений



Для удобства монтажа утилизационный ОЦР-комплекс должен изготавливаться блоками максимальной заводской готовности и в габаритах стандартного транспортного оборудования (железнодорожной платформы, контейнера и др.).

На рис. 25 показан вариант компоновки на общей раме ОЦР-установки мощностью 300 кВт.

По предварительным оценкам, конструктивно ОЦР-установка мощностью 1 МВт может разместиться в габаритах стандартного сорокафутового контейнера (рис. 26).

Модульная система установки Climeon HeatPower показана на рис. 27. Модуль HeatPower 300 представляет собой полностью интегрированную и автономную систему утилизации низкотемпературного до 100 °С тепла (ORC), которая способна вырабатывать экологически чистую электроэнергию при мощности до 355 кВт. Несколько модулей могут быть интегрированы в единую систему для увеличения выходной мощности.

Комплектная установка с турбогенератором, работающим по циклу ОЦР, приведена на рис. 28.

Охлаждающий комплект включает в себя сухой охладитель и соответствующие трубопроводы и насосы. Размеры комплекта: ширина 72 дюйма (1829 мм), глубина 95 дюймов (2413 мм), высота 85 дюймов (2159 мм), вес 5700 фунтов (2591 кг). Размещение модуля — внутри или снаружи помещения. Размещение конденсатора — снаружи помещения.

Как отмечалось ранее, ОЦР-комплекс можно разместить в непосредственной близости от ГТУ.

Варианты компоновочных решений по одноконтурной (без термомасла) ОЦР-установке показаны на рис. 29.

Пример компоновочного решения для одноконтурного ОЦР-комплекса мощностью 4,5 МВт за газовой турбиной мощностью 16 МВт показан на рис. 30. Турбина с генератором и насосным оборудованием размещаются в боксе-укрытии, воздушный конденсатор и рекуператор устанавливаются на открытом воздухе. Габариты воздушного конденсатора и число секций показаны условно, они зависят от климата и требований по мощности конкретной установки.

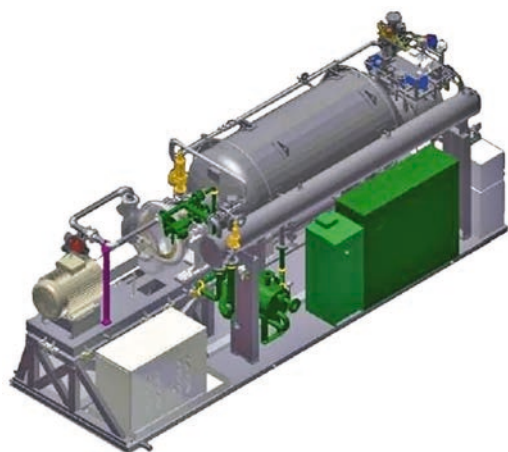


Рис. 25. Утилизационный энергокомплекс 300 кВт [20]

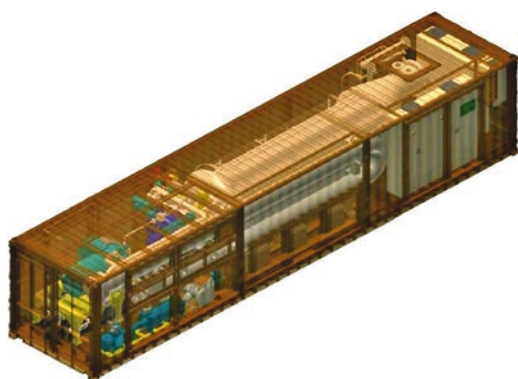


Рис. 26. ОЦР-установка мощностью 1 МВт в контейнере длиной 12,192 м

Источник: <https://www.urgk.ru/wp-content/uploads/2020/03/orc5.png?v=1626252791>

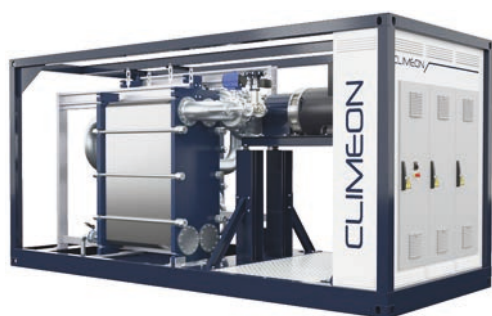


Рис. 27. Модульная система Climeon HeatPower 300

Источник: <https://heat-exchanger-world.com/transforming-petrochemical-sustainability-low-temperature-waste-heat-recovery/>



Рис. 28. Модуль питания 75 кВт с охлаждающим комплектом [20]

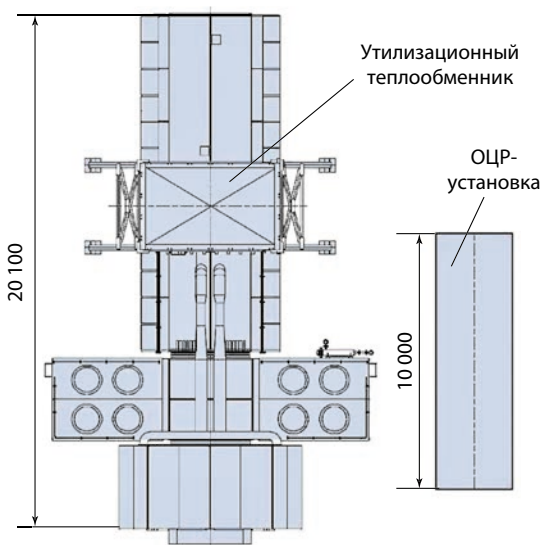
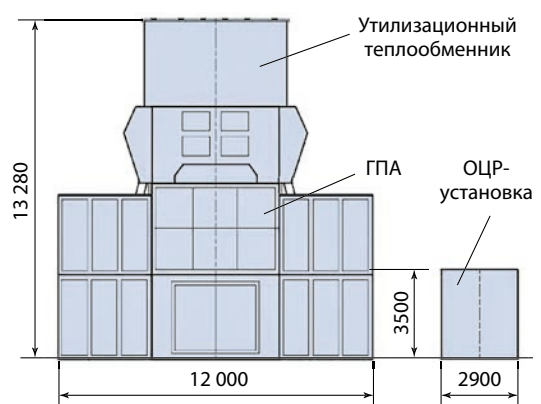
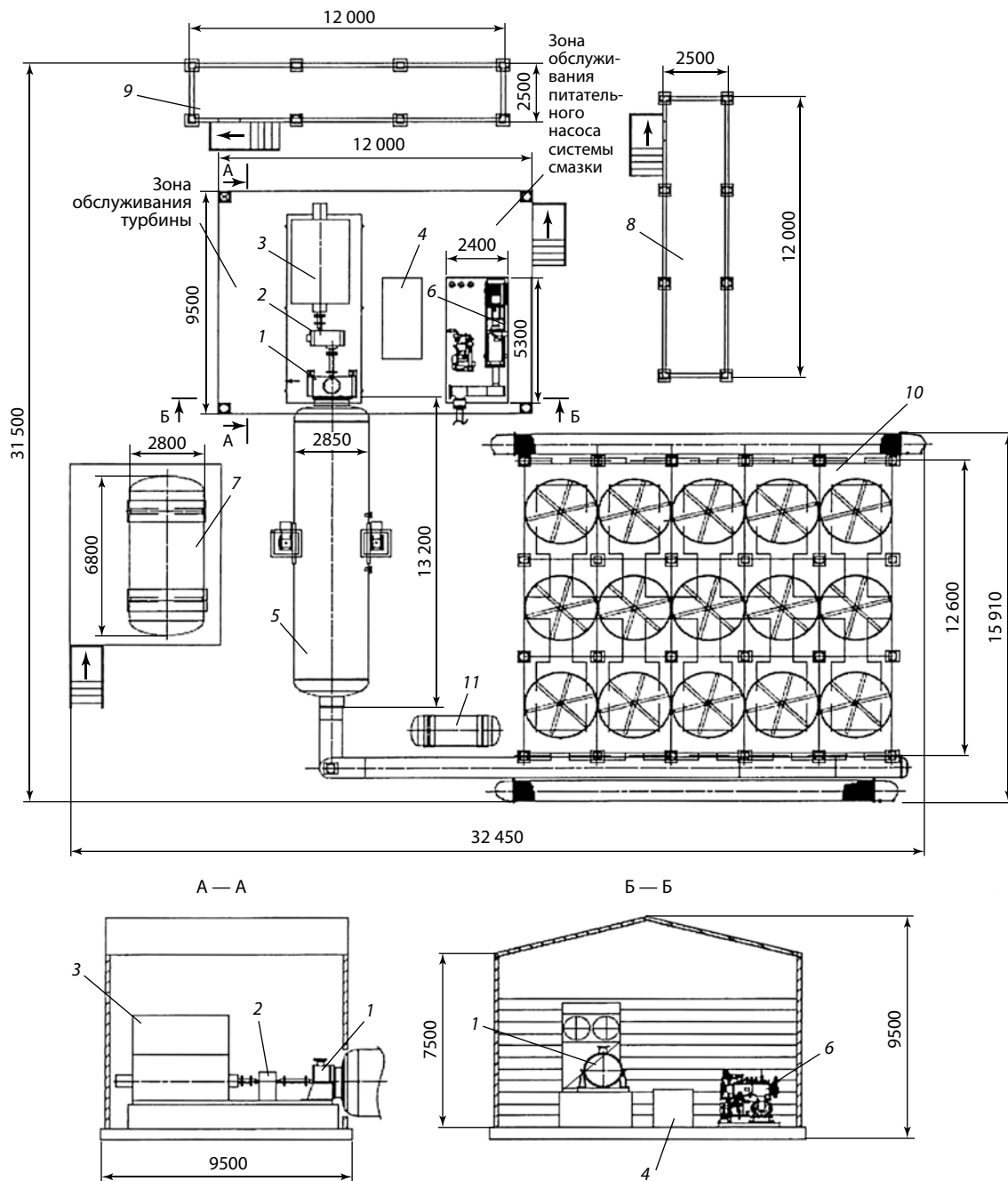


Рис. 29. Компонировка ОЦР-установки на площадке компрессорной станции [20]

Рис. 30. ОЦР-энергокомплекс с воздушным конденсатором [20]



Поз.	Наименование	Кол.	Характеристика	Прим.
1	Турбина	1	6500 кг	
2	Редуктор	1	4000 кг	
3	Генератор	1	40 000 кг $N_{эл} = 5000$ кВт	
4	Система смазки турбины	1	5000 кг	
5	Рекуператор	1	60 000 кг	
6	Питательный насос, фильтры	—	8000 кг	
7	Парогенератор	1	25 000 кг	
8	Контейнер блока управления	1	10 000 кг	
9	Контейнер электротехнический	1	10 000 кг	
10	Воздушный конденсатор	1	300 000 кг	
11	Бак-ресивер НТП	1	9500 кг	



<https://dmliefer.ru/baker-hughes-nuovo-pignone>

Компания Ormat (Израиль) за 40 лет
произвела более 3000 установок
на органическом цикле Ренкина

3 Основные зарубежные производители комплексов на базе ОЦР-технологии



Компания Ormat. Компания Ormat (Израиль, штаб-квартира в США) за 40 лет произвела более 3000 установок на органическом цикле Ренкина, в том числе 26 на крупных объектах и 19 на компрессорных станциях, использующих тепло газотурбинных установок. Оборудование поставлено в более чем 55 стран, общее время эксплуатации превышает 100 млн ч работы. Варианты компоновки ОЦР-установок ORMAT с воздушным конденсатором показаны на рис. 31.

Так, с 2015 по 2019 год компания ORMAT [12] запустила в эксплуатацию геотермальные бинарные энергоустановки с общей установленной мощностью 1090 МВт, что почти в 2 раза превышает этот показатель за период с 2010 по 2014 год (рис. 32)

В настоящее время единичная мощность бинарных установок ORMAT достигла 25 МВт, а общая мощность находящихся в эксплуатации установок превысила 3100 МВт.

Специалисты ORMAT разработали и в большом количестве поставили заказчикам небольшие электростанции мощностью 5—10 кВт, отличающиеся оригинальной конструкцией (рис. 33). Строго говоря, такая установка не относится к теплоутилизационному типу, поскольку для ее работы необходимо топливо. Однако в качестве топлива могут использоваться его бросовые и дешевые виды.

В нижней части установки расположен жаротрубный парогенератор, обогреваемый газовой горелкой. В верхней части имеется воздухоохлаждаемый конденсатор. Между ними расположен турбогенератор и питательный насос на одной оси. В таком исполнении возможен запуск установки без внешнего источника электроэнергии за счет перепада высот.

Компания Turboden. Компания Turboden S.R.L. (Италия) в 2020 году отметила свое 40-летие. В 1998 году увидела свет первая ОЦР-установка фирмы Turboden мощностью 300 кВт в составе комплекса утилизации тепла биомассы в Швейцарии. В 2009 было продано уже 100 установок, работающих по органическому циклу Ренкина.

В 2013 году Mitsubishi Heavy Industries приобрела контрольный пакет акций компании Turboden, благодаря чему последняя получает широкую поддержку в оказании помощи по установке и обслуживанию ОЦР-электростанций.

Сегодня в активе компании более 300 установок по всему миру, из которых 240 находятся в эксплуатации, а штат сотрудников насчитывает более 200 человек.



Рис. 31.
ОЦР-комплекс ORMAT с воздушным конденсатором

Источник: <https://chelyabinsk.urgk.ru/zh/mini-chp/ji-yu-re-you-xi-tong-%EF%BC%88ooc%EF%BC%89-de-fa-dian-chang/>

30

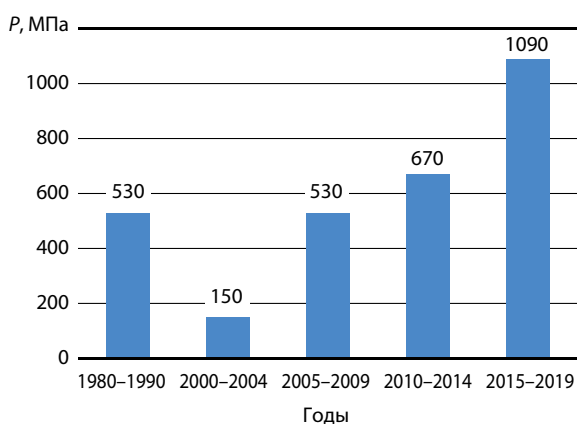


Рис. 32.
Установленная мощность геотермальных бинарных энергоустановок, построенных компанией ORMAT [12]

На рис. 34 показан блок ORC — турбина и конденсатор, на рис. 35 — ОЦР-установка компании Turboden на геотермальной станции.

Компанией Turboden изготовлены и поставлены в различные страны установки, работающие на следующих видах энергии:

- на древесной биомассе (221 установка суммарной мощностью 263 МВт);
- на геотермальной энергии (5 установок);
- на тепле отработавших газов поршневых двигателей (8 установок) и ГТУ (1 установка);
- на тепле горячих газов промпредприятий цементной, металлургической, стекольной промышленности, отходах (16 установок).

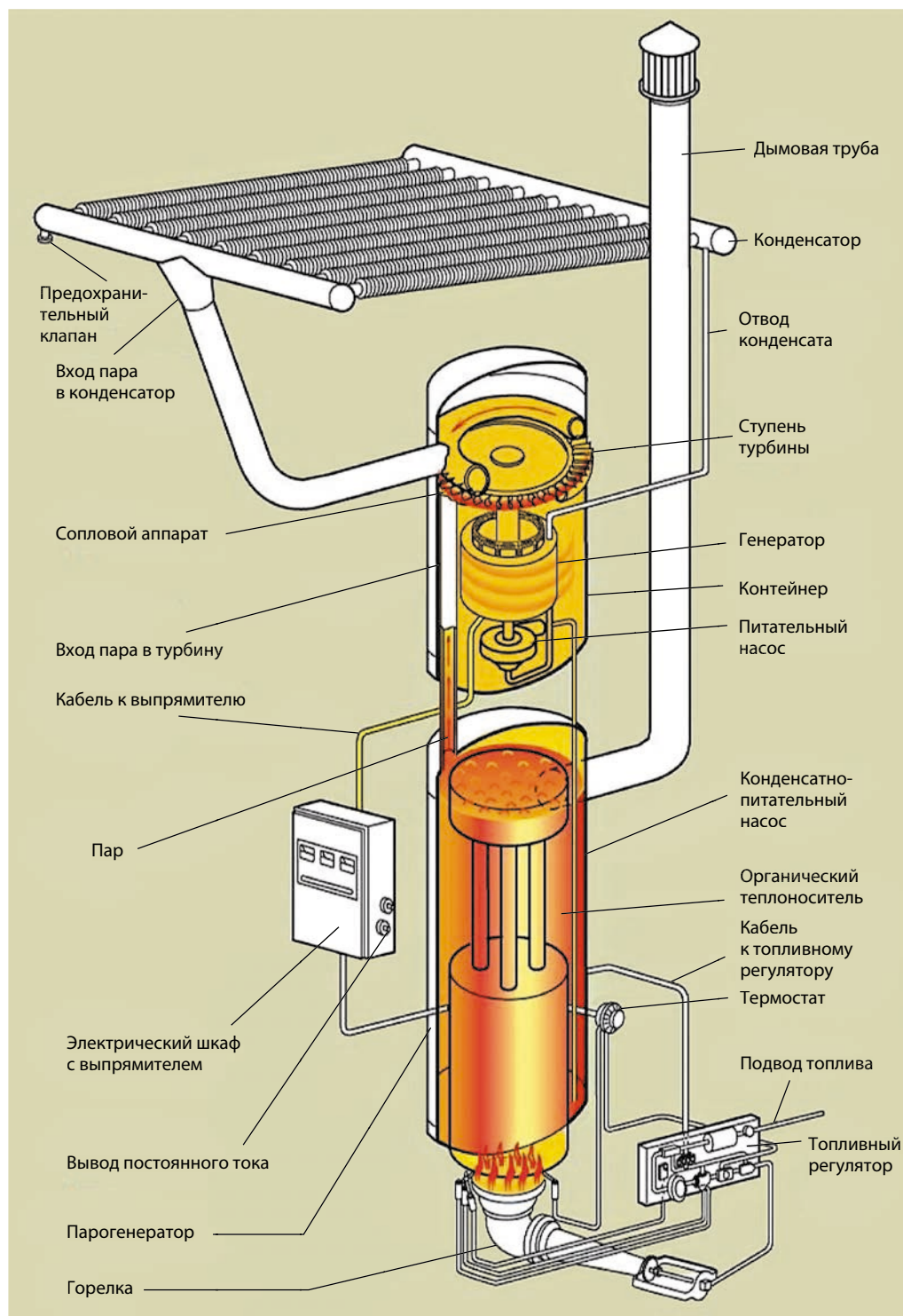


Рис. 33.
Схема установки ORMAT с НРТ для производства электроэнергии

Источник: <https://by.bizorg.su/minsk-rg/c317971-advantek-ao/goods>



Рис. 34.
Конденсатор и фреоновая турбина компании Turboden

Источник: <https://sices.eu/en/projects/turboden/>

Компания Turboden первая из зарубежных компаний внедрила в России на заводе компании «Лукойл-Пермь» относительно мощную ОЦР-установку (1,8 МВт электроэнергии и 10 МВт тепла на технологические нужды). Установка работает на тепле от сжигания попутного нефтяного газа.

Компания General Electric (Nuovo Pignone).

Компания Nuovo Pignone («Нуово Пиньон») существует уже более чем 150 лет. В 1960 г. начинает сотрудничество с General Electric (GE). В 90-е гг. GE приобретает до 91 % акций компании, и Nuovo Pignone становится итальянской дочерней фирмой GE со штаб-квартирой во Флоренции (Италия).

Nuovo Pignone является одним из мировых лидеров в области оборудования для компримирования газа и производства газовых компрессоров и газотурбинных генераторов. Компания конструирует и производит центробежные, осевые и поршневые компрессоры, газовые и паровые турбины, центробежные и многоступенчатые насосы и различное оборудование для нефтяной и газовой промышленности, трубопроводов, нефтепереработки, нефтехимии и производства электроэнергии.

Также компания Nuovo Pignone недавно начала заниматься разработками систем утилизации тепла выхлопных газов на базе ORC-установок под торговой маркой ORegen.

Компания сразу начала разработки с большой мощности. Первая подобная установка запущена



Рис. 35.
ОЦР-установка Turboden с воздушным конденсатором на геотермальной станции

Источник: <https://agroalimentiedintorni.blogspot.com/p/portale-chimico-tecnologico.html>

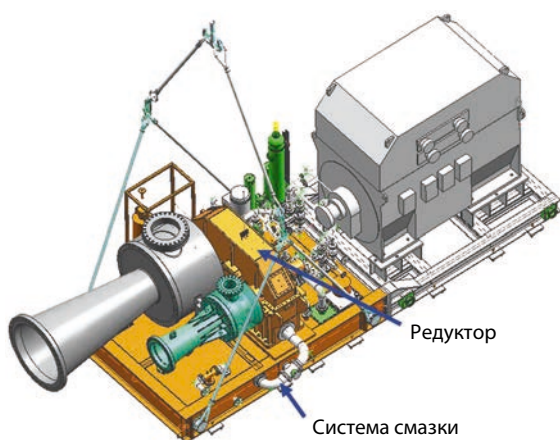


Рис. 36.
Турбогенераторный блок ОЦР мощностью 14 МВт

Источник: <https://kozharulitvrn.ru/organicheskiy-tsikl-renkina.html>

на в 2013 году на газоперекачивающей станции компании Canada's Alliance Pipeline в городе Уайтекорт канадской провинции Альберта. Электрическая мощность составляет 14 МВт. Установка рассчитывалась на утилизацию тепла от ГТУ LM-2500. Информацию о часах, наработанных установкой, компания не предоставляла.

Из-за невозможности сработать при 14 МВт электрической мощности всю разницу энтальпий в одной радиальной турбине компания GE была вынуждена предложить двухступенчатую турбину — две радиальных турбины, соединенные между собой трубопроводом циклопентана (рис. 36).

Одна турбина высокого давления, другая низкого давления с разными скоростями вращения, что потребовало создания сложного редуктора при работе на один генератор. Наличие такой схемы ухудшает надежность всей установки.





<https://www.ottaviotomasini.it/foto/centrale-geotermica-per-hochtief-monaco-di-germania-11/>

Экономическая эффективность
ОЦР-установок в большой степени зависит
от температуры греющего теплоносителя

4 Экономические показатели ОЦР-блока



Экономическая эффективность ОЦР-установок в большой степени зависит от температуры греющего теплоносителя. Эта зависимость отражена на рис. 37, где приведена удельная стоимость установленной мощности [10].

Установки прямого цикла (водяной пар) имеют удельную стоимость 1000—2500 долл/кВт, комбинации с ОЦР-циклом — 2500—3000 долл/кВт, работающие только по ОЦР на низкотемпературных источниках — 3000—5000 долл/кВт, т.е. ОЦР-установки имеют самую низкую экономическую эффективность.

В качестве примера рассмотрим проект Ormat, реализованный на компрессорных станциях (КС) газопровода вдоль Северной границы США. С 2006 по 2009 год Ormat построила и установила серию утилизационных электростанций, которые преобразуют отходящее тепло от выхода ГПА в электроэнергию, обеспечивая выработку 53 МВт электроэнергии [12].

При работе с полной утилизацией тепла установки стабильно выдают в сеть мощность 5,5 МВт или более при КПД до 15 %. Электростанция повысила общий КПД КС с 32 % для простого цикла до 41 % для комбинированного. Годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание составляют менее 200 тыс. долл. США в год (1,45 % капитальных затрат). Капитальные затраты ORMAT на утилизационную установку мощностью 5,5 МВт на КС № 7 составили 13,75 млн долл. США, или 2500 долл. США за 1 кВт установленной мощности. По оценкам ORMAT окупаемость проекта обеспечивается при минимальной закупочной цене в размере 5 центов за 1 кВт · ч (данные 2009 года). Чистая приведенная стоимость (NPV) этого проекта рассчитана с учетом различных условий контракта (длительностью от 15 до 25 лет) и стоимости капитала в диапазоне от 6 до 10 % для проектов экологически чистой энергетики. Положительные значения NPV варьировались от 2 до 12 млн долл. США (в ценах 2006 года). Внутренняя норма доходности (IRR) варьировалась от минимальной (5 % для 15-летнего контракта) до максимальной (15 % для 25-летнего контракта). Эти значения не включают в себя какие-либо федеральные или государственные субсидии на генерацию экологически чистой электроэнергии.

На основании приведенных ретроспективных данных можно оценить себестоимость производства электроэнергии ОЦР-комплексами в условиях 2024 года.

Для приведения капитальных затрат к текущим ценам используем индекс цен производителей (PPI), рассчитываемый Бюро статистики труда США (BLS).

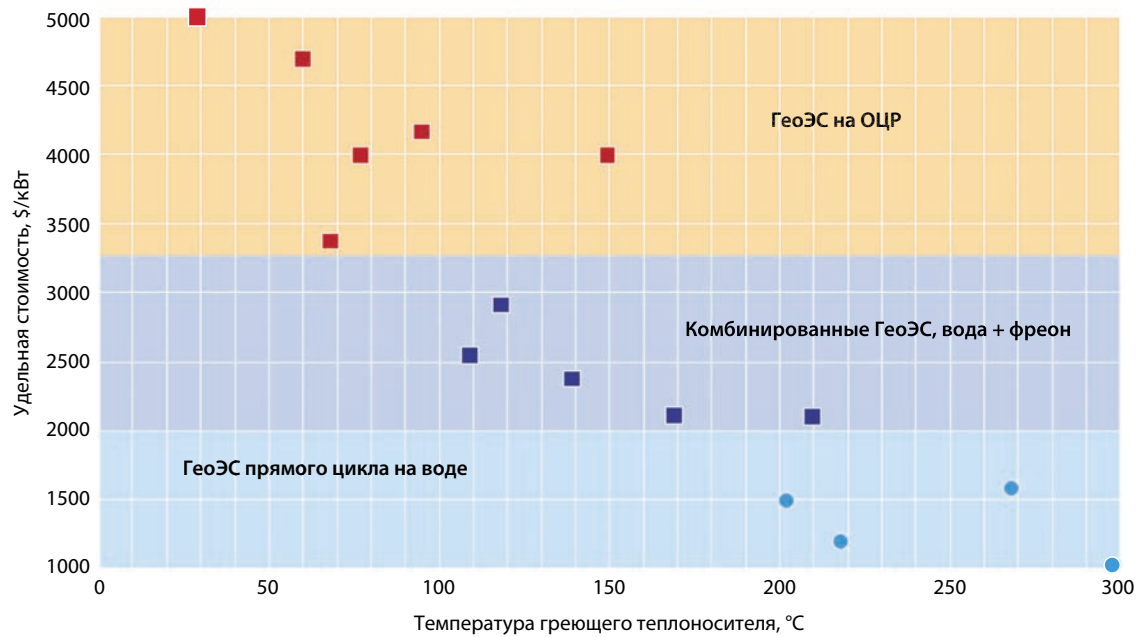


Рис. 37. Сведения о стоимости установленной мощности ГеоЭС [10]

Таблица 8
Расчет себестоимости электроэнергии утилизационного теплоэнергетического комплекса

Показатель	Значение
1. Удельные капитальные затраты в ценах 2009 г., долл. США/кВт	2500
2. PPI, %	142
3. Удельные капитальные затраты в ценах 2024 г., долл. США/кВт	3562
4. Курс, руб/ долл. США	93
5. Удельные капитальные затраты в ценах 2024 г., руб/кВт	331 310
6. Срок службы, лет	20
7. Годовая амортизация, руб/кВт	16 565
8. Затраты на эксплуатацию и техобслуживание (доля от затрат КЗ)	1,45
9. Затраты на эксплуатацию и техобслуживание, руб/кВт	4804
10. Годовая наработка, (принимается по наработке ГПА), ч	6570
11. Коэффициент загрузки (принимается по наработке ГПА)	0,85
12. Годовая выработка электроэнергии, кВт · ч	5584
13. Себестоимость электроэнергии: (п. 7 + п. 9)/п. 12, руб/(кВт · ч)	3,83

Примечания: 1. Удельные затраты и амортизация рассчитаны на 1 кВт установленной мощности.
2. ГПА — газоперекачивающий агрегат.

По имеющимся данным за период 2009—2024 гг. РРП составил 142,5 %. Расчет себестоимости электроэнергии для утилизационных энергокомплексов мощностью 1 МВт (проект Калужского турбинного завода «Турбокон») представлен в табл. 8.

Предварительная оценка себестоимости электроэнергии, генерируемой ОЦР-энергокомплексом, находится на уровне стоимости сетевой электроэнергии в зоне централизованного

энергоснабжения России. При освоении серийного производства оборудования внедрение таких установок может быть целесообразно для новых КС, подключаемых к электросетям (с учетом платы за технологическое присоединение), и для изолированных КС, запитанных от ГТЭС собственных нужд.

Таким образом можно оценить ОЦР-установку как вполне рентабельную в условиях действующих цен в России в настоящее время.

Заклучение

Потенциал энергосбережения России составляет около 30 % общего энергопотребления и является базой для производства электроэнергии без дополнительных затрат топлива и выбросов CO₂.

Эффективными утилизаторами на базе низкопотенциальных источников тепла являются энергоустановки, работающие по циклу Ренкина с использованием в качестве рабочего тела фреонов R245fa, R134a и углеводородов (изопентан, изобутан и т.п.).

Такие установки имеют преимущества перед пароводяными блоками по термодинамическим показателям (более глубокая утилизация тепла), по массогабаритным (более компактные) и эксплуатационным в аспекте использования их в изолированных районах Севера.

Отечественная промышленность располагает необходимыми технологиями и материалами для создания всего спектра узлов, аппаратов и меха-

низмов этих установок на низкикипящем рабочем теле: теплоутилизаторов, парогенераторов, турбин, воздушных и водоохлаждаемых конденсаторов. Но при этом полноценного референтного образца ОЦР-установки нет.

Зарубежные фирмы (ORMAT, Turboden и др.) накопили большой опыт изготовления, поставки и эксплуатации тысяч таких установок; основное их назначение — использование тепла промышленных предприятий (в частности, деревообработки), геотермальных источников и компрессорных станций газопроводов.

Россия, располагающая разветвленной газотранспортной сетью, может успешно с технической и экономической точки зрения внедрять установки на компрессорных станциях, объектах нефтедобычи и нефтепереработки, а также на промышленных предприятиях. Есть понимание, что необходимо сделать решительный шаг для их внедрения.

Список использованной литературы

1. **Стратегия** научно-технологического развития Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 // Собрание законодательства Российской Федерации, № 10, 04.03.2024, ст. 1373.
2. **О национальных** целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 // Собрание законодательства Российской Федерации, № 20, 13.05.2024, ст. 2584.
3. **Энергетическая** стратегия РФ на период до 2035 года (с изм. на 28 февраля 2024 г.) : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-Р // Собрание законодательства Российской Федерации, № 24, 15.06.2020, ст. 3847.
4. **Энергосберегающая** технология производства электроэнергии при перекачке природного газа по трубопроводной системе / В.А. Федоров, О.О. Мильман, Д.В. Федоров, А.М. Тринога. Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 12—13.
5. **Томаров Г.В.** Выбор оптимального рабочего тела для бинарных установок на предельно низкотемпературном теплоносителе / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, Е.В. Сорокина // Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 59—67. DOI: 10.1134/S0040363616120067
6. **Томаров Г.В.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180 °C) / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 31—40. DOI: 10.1134/S0040363622030109
7. **Томаров Г.В.** Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 63—71. DOI: 10.1134/S0040363619110067
8. **Повышение** эффективности использования геотермальных ресурсов на основе применения комбинированного энергоблока с бинарной установкой на сбросном сепарате Мутновской ГеоЭС / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, А.И. Никольский, В.Н. Семенов // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 31—35. DOI: 10.1134/S0040363615120115
9. **Working** fluid selection and operating maps for organic Rankine cycle expansion machines / S. Quoilin, S. Declaye, A. Legros, et al. // 21st Intern. compressor engineering conf. at Purdue. Belgium, Liege. July 16—19, 2012. P. 1—10.
10. **Alekseenko S.V.** Geothermal energy / S.V. Alekseenko // GLOBAL ENERGY «10 Breakthrough ideas in energy for the next 10 years». 2022. P. 135—155. URL: <https://globalenergyprize.org/en/2023/06/15/10-breakthrough-ideas-in-energy-for-the-next-10-years/> (дата обращения: 10.08.2023).
11. **Томаров Г.В.** Современная геотермальная энергетика: геотермальные электростанции с бинарным циклом / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 3—12. DOI: 10.1134/S0040363617040099
12. **Томаров Г.В.** Краткий обзор современного состояния и тенденций развития геотермальной энергетики / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2023. № 2. С. 37—46. DOI: 10.56304/S004036362302008X
13. **Томаров Г.В.** Совершенствование геотермальных энергоустановок с бинарным циклом / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, Е.В. Сорокина // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 40—48. DOI: 10.1134/S0040363615120103
14. **Braimakis K.** Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations / K. Braimakis, S. Karellas // Energy Conversion and Management. 2018. V. 159. P. 353—370. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.093

15. **О мерах** государственного регулирования потребления и обращения веществ, разрушающих озоновый слой (с изм. на 1 сентября 2023 г.) : Постановление Правительства Российской Федерации от 18.02.2022 № 206 // Собрание законодательства Российской Федерации, № 9 (ч. I), 28.02.2022, ст. 1323.
16. **Герасимов Р.П.** Стабильность рабочих тел энергетических циклов R218 (C_3F_8) и R31-10 (C_4F_{10}) при температурном воздействии / Р.П. Герасимов, И.М. Мазурин // Энергетик. 2016. № 1. С. 33—35. eLIBRARY ID: 25471376
17. **Preissinger M.** Thermal stability of hexamethyldisiloxane (MM) for high-temperature organic Rankine cycle (ORC) / M. Preissinger, D. Brüggemann // Energies. 2016. Vol. 9. Is. 3. P. 183. DOI: 10.3390/en9030183
18. **Шифрин Б.А.** Варианты турбогенератора утилизационного теплоэнергетического комплекса на базе низкокипящего рабочего тела / Б.А. Шифрин, В.Б. Перов, В.М. Толкачев // Теплоэнергетика. 2021. № 7. С. 26—34.
19. **Polyster** heat transfer, fluids. Москва, 2019. URL: www.sofex-silicon.ru (дата обращения: 10.08.2023).
20. **Анализ** мирового опыта производства ОЦР-установок. Альтернативная энергетика : научный отчет ООО «Малая энергетика». Москва, 2017.

Научно-популярное издание

ЭКОЛОГИЯ, ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Под редакцией академика РАН Александра Викторовича Клименко

Выпуск 3

МИЛЬМАН Олег Ошеревич

ПЕРОВ Виктор Борисович

**ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ
НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА**

Оригинал-макет подготовлен АО «Издательский дом МЭИ»

Подписано в печать 05.11.2024. Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 5,0

Контакты издателя: Инженерное управление ПАО «Мосэнерго».

Тел.: +7 (495) 957-19-57, доб. 30-94.

Электронная почта: staroverovaaa@mosenergo.ru

Управление по работе со СМИ и органами власти ПАО «Мосэнерго».

Тел.: 8 (495) 957-19-57, доб. 22-90, 37-17.

Электронная почта: press-centre@mosenergo.ru.

Адрес в Интернете: www.mosenergo.ru

