

ISSN 0040-3636

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

Научно-производственному объединению
по исследованию и проектированию энергетического
оборудования им. И.И. Ползунова – 85 лет

3

2012

ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»

УДК 620.92:502.174.1

Использование комбинированного пароводяного и органического циклов Ренкина для повышения экономичности ГТУ и ДВС

© 2012 г. Готовский М.А.¹, Гринман М.И.², Фомин В.А.², Арефьев В.К.¹, Григорьев А.А.²
ОАО НПО ЦКТИ¹ – ООО “Комтек-Энергосервис”²

Представлены инновационные концепции утилизации сбросного тепла с использованием низкокипящих рабочих тел, что позволяет повысить эффективность до 28–30%. При реализации распределенной генерации электроэнергии или комбинированного производства тепла и электроэнергии электрический КПД может достичь 58–60%, а коэффициент использования тепла топлива – 90%.

Проблемы повышения энергоэффективности и использования отходящего тепла энергоемких производств в настоящее время весьма актуальны. Большой опыт создания систем утилизации отходов тепла накоплен такими фирмами, как Ormat, Siemens, Turboden и др., однако реальные значения КПД реализуемых циклов ограничены примерно 18%.

Вопрос разумного использования энергетических ресурсов привлекает пристальное внимание специалистов с середины прошлого века, тогда интенсивный рост промышленного производства потребовал повышения его энергоэффективности.

Во многих отраслях, где непосредственно генерируются побочные продукты и топливо (например, черный щелок и древесина – в целлюлозно-бумажной промышленности, синтез-газ – в процессе переработки нефти, легкие газовые смеси – в результате обработки химических веществ, дутьевые газы – в сталелитейных производствах и т.п.), имеется возможность избежать потерь энергии, используя ее в той или иной форме. В системах, основанных на возобновляемых источниках энергии (солнечной, геотермальной и энергии ветра), для производства электроэнергии проблемы потерь обычно рассматриваются отдельно.

Потери существуют и в системах преобразования энергии (например, в теплообменниках, промышленных нагревателях, насосах, двигателях), где эффективность ограничена термическими или механическими факторами.

Безусловно, в широком спектре потерь энергии главное место занимают тепловые потери, т.е. произведенное тепло, которое потребитель не смог полезно использовать и оно было сброшено в окружающую среду. Причем более 75% промышленных отходов тепла имеют температуру ниже 800 К, что в большинстве случаев делает неэффективным применение обычных

технологий (например, пароводяного цикла Ренкина) для выработки электроэнергии.

Органический цикл Ренкина

Существует несколько основных технологий, позволяющих использовать сбросное тепло низкой температуры. Например, на электростанциях мощностью от 300 кВт до 130 МВт на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) в течение последних 20 лет энергия генерируется из различных источников тепла [1, 2]. При этом другие варианты либо технически невозможны, либо экономически невыгодны. Ведущие производители установок с ОЦР приобрели большой опыт в области применения низкокипящих органических веществ для выработки электроэнергии и доказали, что этот цикл хорошо приспособлен для источников тепла низкой температуры. Технология ОЦР применима к рекуперации тепла газовых турбин (ГТ) среднего размера, цементных заводов, геотермальных источников и дает значительные преимущества по сравнению с использованием низкотемпературных паровых турбин. При более высоких температурах в большинстве существующих систем имеется блок рекуперации (рис. 1) между самим источником тепла и органическим рабочим телом (например, высокотемпературным маслом). Достигнутая эффективность утилизации тепла промышленных отходов с помощью систем на базе ОЦР составляет 12–18%, однако возрастание разницы между температурой источника тепла и максимальными температурами (определяются возможностями органических агентов) приводит к снижению этого параметра. Таким образом, для повышения эффективности упомянутую разницу температур необходимо сделать минимальной, выбрав для каждой конкретной схемы оптимальный температурный уровень для передачи тепла органической рабочей среде.

Рабочие тела

Для эффективного использования в системе на основе ОЦР оптимальная рабочая среда должна удовлетворять следующим требованиям:

¹194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 24. ОАО НПО ЦКТИ.

²192148, Санкт-Петербург, Большой Смоленский пр., д.15, корп. 2. ОАО “Комтек-Энергосервис”.

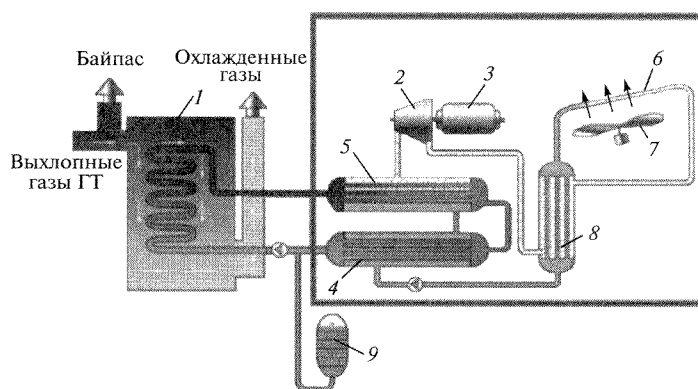


Рис. 1. Схема системы на основе ОЦР фирмы ORMAT.

1 – теплообменник-утилизатор; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – экономайзер; 5 – испаритель; 6 – конденсатор; 7 – вентилятор; 8 – рекуператор; 9 – сливной бак

- положительный наклон пограничной кривой пара в T, s -координатах, чтобы процесс расширения в турбине заканчивался в области перегретого пара, что исключает эрозию лопаток;

- низкая температура замерзания (ниже самой низкой температуры цикла и ниже температуры окружающей среды);

- достаточно высокая температура стабильности (во избежание каких-либо деструктивных химических реакций и разложения);

- высокие теплота испарения и плотность для более эффективного поглощения энергии от источника тепла;

- удовлетворение требованиям экологии и безопасности;

- доступность на рынке и не слишком большая стоимость.

Предварительный анализ различных органических жидкостей показал, что для температуры источника тепла 100–130°C наилучшим рабочим телом для реализации ОЦР является бутан (R-600). Его использование позволяет обеспечить наибольшую мощность турбины благодаря низкой температуре конденсации. Основным недостатком бутана – его горючесть, однако существует несколько доступных технологий уплотнения, которые надежно предотвращают утечку бутана в окислительную атмосферу. Еще один недостаток бутана (как и других низкотемпературных органических жидкостей) – высокая мощность, требуемая для сжатия. Необходимые для этого насосы громоздки, очень дороги и малоэффективны.

Концепция комплексного пароводяного органического цикла Ренкина

В результате анализа разнообразных источников сбросного тепла и возможностей его использования, а также ограничений коммерчески доступных систем на базе ОЦР за основу инновационной концепции развития был принят комплексный пароводяной органиче-

ский цикл Ренкина (КПОЦР) [3]. Главная идея концепции состоит в сочетании паровой турбины (ПТ) с противодавлением и ОЦР, в котором рабочим телом служит бутан (рис. 2). Выхлопные газы от обычных ГТ или ДВС – это источник тепла в котле-утилизаторе для получения перегретого пара высокого давления, который затем поступает в ПТ с противодавлением для выработки электроэнергии. Пар низкого давления после выхода из ПТ служит источником тепла для генерации бутанового пара, который направляется в бутановую турбину для дополнительного производства электроэнергии, или непосредственно потребителю тепловой энергии. В системах комбинированной выработки электроэнергии и тепла их соотношение может регулироваться с помощью бутанового цикла. Следует также отметить, что при расширении насыщенный пар низкокипящего органического рабочего тела в турбине становится перегретым, поэтому не возникает проблем повышения влажности и эрозионного

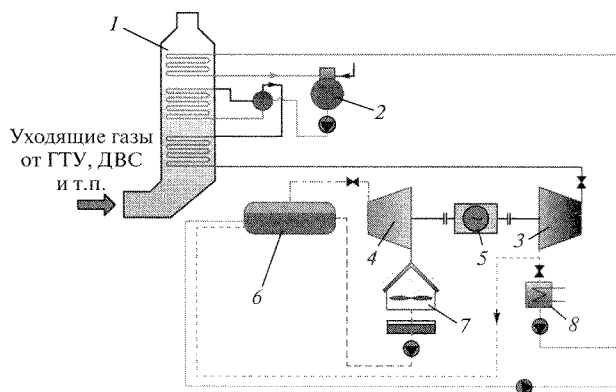


Рис. 2. Схема когенерационной установки ООО "Комтек-Энергосервис" на базе КПОЦР.

1 – котел-утилизатор; 2 – деаэратор; 3 – паровая турбина с противодавлением; 4 – бутановая турбина; 5 – электрогенератор; 6 – генератор бутанового пара; 7 – конденсатор бутана; 8 – подогреватель сетевой воды

износа лопаток. Одна из главных особенностей предложенной концепции — это использование для многоступенчатого сжатия бутана малогабаритных, дешевых струйных насосов (инжекторов) вместо дорогих, громоздких и неэффективных насосов, что позволит свети к минимуму потери на сжатие бутана.

Потери энергии в инжекторах превращаются в дополнительное тепло, которое также утилизируется в бутановом цикле, в то время как применение насосов снижает электрическую мощность установки. Использование бутана в качестве рабочего тела позволяет разработать компактную турбину благодаря существенному снижению (на два порядка) объемной скорости бутанового пара в последних ее ступенях. Действительно, при конденсации водяного пара при температуре 30°C его удельный объем равен 32.9 м³/кг при давлении 0.00425 МПа, в то время как удельный объем бутана составляет 0.14 м³/кг при давлении 0.281 МПа. Вследствие этого бутановый контур не требует сложной системы деаэрации. Бутановая турбина очень похожа на коммерческую газовую турбину для низких температуры и давления. Такие турбины компактны и надежны в эксплуатации.

Преимущества использования КПОЦР в схемах утилизации тепла

Практическая реализация КПОЦР позволяет максимально использовать отработанное тепло в течение всего года, в то время как в обычном цикле ПТ с противодавлением генерирует номинальную электрическую мощность только в течение 5 мес.

Предложенный подход к утилизации сбросного тепла обладает следующими существенными преимуществами по сравнению с применяемыми в настоящее время системами на базе ОЦР:

- более высокий электрический КПД;
- возможность выбора оптимальных параметров при наличии тепловой нагрузки;
- возможность регулирования соотношения между производством электроэнергии и тепла;
- сокращение выбросов парниковых газов;
- низкий уровень капиталовложений и эксплуатационных расходов.

Предварительные расчеты бутанового КПОЦР для коммерческой газовой турбины мощностью 6 МВт продемонстрировали примерно 25%-ное увеличение производства электроэнергии, для коммерческих ДВС — 20%-ное. Одним из возможных объектов применения КПОЦР являются поршневые газовые ДВС, которые широко используются в качестве приводов для газовых компрессоров и генераторов в сети распределения природного газа. Потери тепла с выхлопными газами для ДВС ниже, а электрический КПД выше, чем для ГТ, поэтому прирост электрического КПД при реализации цикла для ДВС меньше, чем для ГТ. Однако учет потерь тепла при охлаждении ДВС позволяет значи-

тельно повысить общую эффективность использования отходящего тепла на базе концепции КПОЦР (примерно в 1.5 раза).

На рис. 3 приведены энергетические характеристики установок на базе КПОЦР (фирма “Комтек-Энергосервис”) и ОРЦ (фирма АВВ). Для температуры выхлопных газов 300°C их мощности практически одинаковы. При увеличении температуры выхлопных газов установка на основе КПОЦР производит в идентичных условиях значительно больше энергии, чем на основе ОЦР. Эта разница возрастет с повышением температуры выхлопных газов.

Для оценки эффективности КПОЦР был также выполнен расчет комбинированной системы (рис. 4), построенной на трех газовых поршневых двигателях фирмы “Вяртсиля” модель 20V34SG. Основные результаты расчета приведены далее.

Дизельные двигатели

Полная электрическая мощность трех машин, МВт.....	26.2
Температура выхлопных газов, °С.....	390
Тепловая мощность потоков выхлопных газов, МВт.....	18.8
Полная тепловая мощность систем охлаждения, МВт.....	12.6

Турбина

Электрическая мощность турбины с противодавлением, МВт.....	1.7
Электрическая мощность бутановой турбины, МВт.....	2.3
Суммарная электрическая мощность турбин, МВт.....	4.0
Отношение электрической мощности, получаемой в результате утилизации тепла, к полной электрической мощности трех машин.....	0.153

Теплофикационная установка

Тепловая мощность, отпускаемая потребителю, МВт.....	3.8
Энергетические характеристики всей установки	
Общая электрическая мощность, МВт.....	30.2
Общий электрический КПД, %.....	53.6
Коэффициент использования тепла топлива с учетом отпуска тепла потребителям, %.....	60.4

По сравнению с установками без утилизации тепла выработка электроэнергии увеличилась более чем на 15%, а коэффициент использования тепла топлива с учетом тепла потребителям превысил 60%. Предлагаемую схему можно рассматривать как некоторое обобщение идей использования регенерации для приближения КПД энергетических установок к КПД цикла Карно.

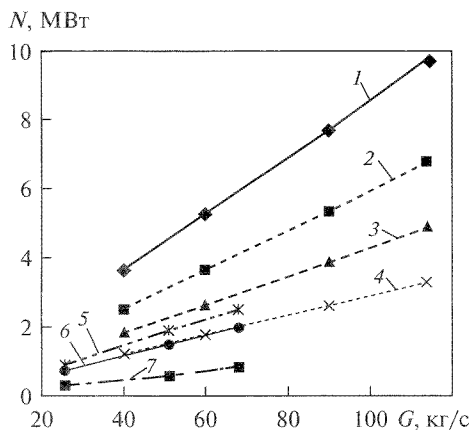


Рис. 3. Зависимость мощности установок на основе ОЦР (1–4) и КПОЦР (5–7) от расхода и температуры уходящих газов.

Температура, °С: 1 – 466; 2 – 400; 3 – 350; 4 – 300; 5 – 350; 6 – 300; 7 – 200

Далее рассматриваются преимущества применения инжектора. В табл. 1 представлены результаты расчетов основных параметров двух вариантов тепловой схемы бутанового контура, различающихся процессами сжатия жидкого бутана. При одинаковом подводе внешнего тепла в парогенераторе (18900 кВт) в схеме без инжектора подогрев бутана выше, чем в схеме с инжектором. Поэтому в первом случае общий подвод внешнего тепла должен быть больше.

Мощность, необходимая для сжатия бутана, в схеме с инжектором более чем на 200 кВт меньше, чем в схеме с одноступенчатым сжатием, что обеспечивает около 7% дополнительной электрической мощности.

Были также сделаны предварительные оценки времени окупаемости установок на базе КПОЦР – в зависимости от стоимости электроэнергии оно составит 4–10 лет (при удельных капитальных вложениях 1400 дол./кВт установленной мощности).

ОЦР с перегревом пара и регенерацией

Использование КПОЦР может вызывать опасения у потребителей в связи с тем, что при эксплуатации установки в условиях экстремально низких температур возможно возникновение аварийной ситуации из-за замерзания воды в пароводяном контуре. В этом случае даже в ущерб эффективности возникает желание отказаться от пароводяного контура. При этом можно применить схему с промежуточным теплоносителем (например, высокотемпературным маслом), описанную ранее (см. рис. 1), и частично утилизировать тепло выхлопных газов. Для этого необходим низкокипящий теплоноситель с более высокой температурой кипения (например, пентан или циклопентан). Тепло выхлопных газов можно использовать также для перегрева пара низкокипящего теплоносителя. Расчетный анализ такого варианта был проведен применительно к агрегату ГТН-18 с использованием пентана (табл. 2). Перегрев пентанового пара на 13,7°С позволил увеличить КПД нетто приблизительно на 2,4%.

Таким образом, инновационная концепция КПОЦР может быть успешно реализована для повышения тер-

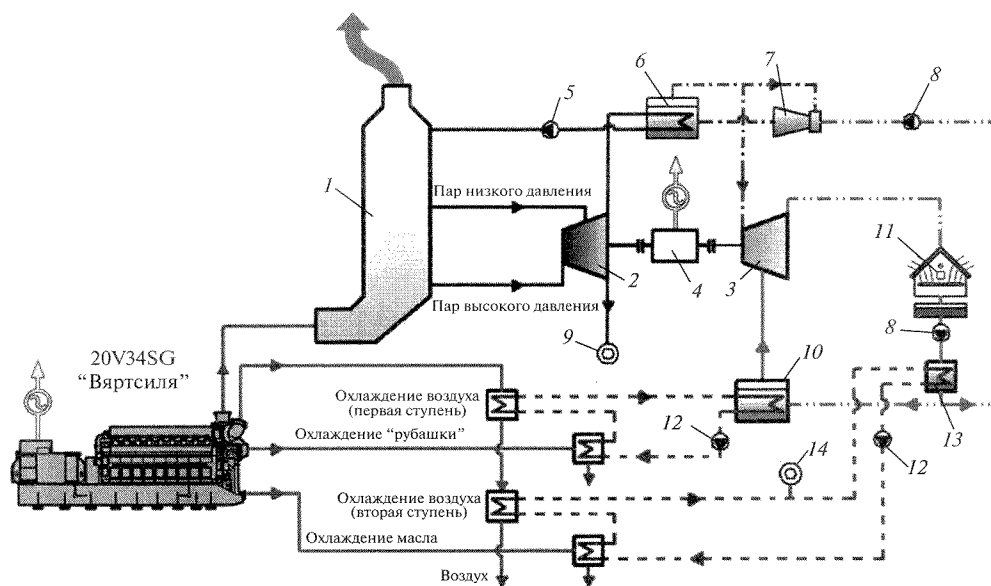


Рис. 4. Схема использования КПОЦР для дизелей фирмы «Вяртсиля».

1 – паровой котел-утилизатор; 2, 3 – паровая и бутановая турбины; 4 – электрогенератор; 5, 8 – конденсатные насосы воды и бутана; 6, 10 – испарители бутана высокого и низкого давления; 7 – инжектор; 9 – потребитель пара; 11 – воздушный конденсатор; 12 – циркуляционный насос; 13 – подогреватель бутана; 14 – теплофикация

Таблица 1. Параметры бутанового контура

Параметр	Схема	
	с инжектором	без инжектора
Тепло, подведенное в парогенераторе от греющего водяного пара, кВт	18900	18900
Бутановый пар для инжектора:		
коэффициент инжекции	3.41	—
энтальпия, кДж/кг	746.4	—
давление, МПа	2.63	—
расход, т/ч	42.1	—
Пар за бутановой турбиной:		
расход, т/ч	143.7	145.3
давление, МПа	0.2814	0.2814
энтальпия, кДж/кг	674.5	674.5
Жидкий бутан в инжекторе:		
давление на входе/выходе, МПа	0.8/2.9	—
температура на входе/выходе, °С	30.5/72.5	—
энтальпия на входе/выходе, кДж/кг	272.8/380.2	—
расход на выходе, т/ч	185.8	—
Жидкий бутан в насосе:		
давление на входе/выходе, МПа	0.2814/0.8	0.2814/0.8
температура на входе/выходе, °С	30.0/30.5	30.0/32.3
энтальпия на входе/выходе, кДж/кг	271.5/272.8	271.5/278.1
удельная работа сжатия, кДж/кг	1.3	6.6
удельный объем, м ³ /кг	0.00176	0.00176
расход на выходе, т/ч	143.7	145.3
Конденсатный насос:		
КПД, %	70	70
потребляемая мощность, кВт	52	266
Внутренняя мощность турбины (нетто), кВт	2818	2636
Термический КПД цикла, %	15.0	13.9

Таблица 2. Эффективность перегрева пентана

Параметр	Схема	
	с насыщенным паром	с перегретым паром и регенерацией
Температура пара пентана на входе в турбину, °С	180.2	193.9
Давление пара пентана на входе в турбину, МПа	26.2	24.3
Температура конденсации пара пентана, °С	40	40
Электрическая мощность установки (нетто), кВт	4155	4816
Электрический КПД установки (нетто), %	14.0	16.4

мической эффективности промышленных процессов и систем с распределенной генерацией тепла. Она позволяет эффективно использовать сбросное тепло путем комбинированного производства тепла и электроэнергии с помощью ПТ с противодавлением и бутанового ОЦР.

Предложенную концепцию можно применять как при разработке новых установок, так и при модернизации старых. В последнем случае ожидается увеличение выработки электроэнергии более чем на 20%. При комбинированном производстве тепла и электроэнергии общий электрический КПД может быть повышен до 58–60%.

Кроме того, при использовании КПОЦР достигается более высокая энергоэффективность, чем у имеющих систем на базе ОЦР. Поскольку при температуре сбросного тепла на уровне 300°С производительность КПОЦР близка к таковой ОЦР, то КПОЦР можно считать экономически эффективным при температуре уходящих газов в диапазоне 300–500°С.

Список литературы

1. **Bronicki L.Y.** Organic Rankine Cycle Power Plant for Waste Heat Recovery. ORMAT, 2005. www.ormat.com.
2. **Energy Use and Opportunities Analysis: US Manufacturing and Mining // US Department of Energy Industrial Technologies Program, 2004.**
3. **Steam Organic Rankine Cycle (SORC) for Distributed Generation and Combined Heat and Power Production / Y. Chudnovsky, M. Gotovsky, M. Greenman et al. // Proc. of IHTC-14 (IHTC14-22704). Washington, 2010.**