

# ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС НА НИЗКОКИПЯЩИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

**Е. Г. Шадек**, канд. техн. наук, старший менеджер,

**Б. И. Маршак**, ведущий инженер, ГК «RAINBOW-Инженерные системы», Москва

**И. Н. Крыкин**, независимый эксперт,

**А. Н. Блинов**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания»

Важнейшим направлением развития энергоснабжения коммунального хозяйства и промышленного производства России является энергосбережение, предполагающее как внедрение новых, менее энергоемких технологических процессов, так и использование низкопотенциальной энергии, которая в большинстве случаев неконтролируемо сбрасывается, вызывая тепловое загрязнение окружающей среды. Перспективным решением проблемы утилизации сбросного тепла является применение энергетических установок на низкокипящих теплоносителях (НКТ), работающих по органическому циклу Ренкина (ОРЦ-модулей).



**И**сключительные достоинства технологии с ОРЦ-циклом, возможность получения электроэнергии на низкопотенциальном сбросном тепле, экологичность и др. определили ее высокую конкурентоспособность и востребованность [1–4]. Однако сегодня ни одна из российских фирм не производит серийные ОРЦ-модули.

Несмотря на многочисленные разработки, выполненные за последние годы, сегодня, насколько известно, кроме энергоустановки с ОРЦ-циклом на Паратунской ГеоЭС (см. справку) и находящейся в стадии наладки одной энергоустановки на Менделеевской ГеоТЭЦ на Курилах, ни одного реализованного проекта ОРЦ-системы в России нет. Тем не менее налицо все признаки (многочисленные запросы, обращения и пр.) того, что в ближайшее время дело сдвинется с мертвой точки.

### Выбор низкокипящих теплоносителей (НКТ)

Схемы ОРЦ нередко позиционируют как утилизационные, они могут быть экономически эффективны при температуре низкопотенциального источника тепла от 80 °С и выше. Оптимальный выбор НКТ, как и параметров цикла ОРЦ, зависит от потенциала источника тепла.

В ряде работ рекомендуется при  $T_{и}$  от 140 до 190 °С использовать в качестве НКТ углеводородные соединения: пентан ( $C_5H_{12}$ ), бутан ( $C_4H_{10}$ ) или изобутан  $CH(CH_3)_3$ , а в диапазоне 100–130 °С – фреоновые соединения [2]. В указанных температурных интервалах КПД установки ОРЦ варьируется от 13 до 15%. В интервале  $T_{и}$  300–350 °С КПД достигает 18–20%.

Применяют также фреоны, водный раствор аммиака, пентан, бутан, изобутан, составы R-134a, R-245f, R-22, Terminol и др.

Из четырнадцати представленных в [2] разработок только в шести случаях утилизируется тепло уходящих газов (УГ). Собственно утилизация тепла УГ эффективна<sup>1</sup>, когда их температура ( $T_{ух}$ ) около или больше 200 °С.

### Экономическая эффективность

Удельные капитальные затраты сильно зависят от установленной мощности. Как правило, утилизация тепла уходящих газов требует дополнительных затрат на ис-



Еще в 1965 году советские ученые С.С. Кутателадзе и А.М. Розенфельд получили патент на получение электроэнергии из горячей воды с температурой более 80 °С [1]. Уже в 1967 году на Камчатке построена и пущена в опытно-промышленную эксплуатацию первая в мире ГеоЭС с ОРЦ-циклом – Паратунская ГеоЭС мощностью 600 кВт [2]. В ходе испытаний доказана техническая возможность получения электроэнергии посредством использования низкотемпературного источника тепла в традиционном цикле Ренкина на низкокипящем рабочем теле за счет тепла воды с температурой более 70 °С. Однако сооружение таких станций не получило должного развития из-за низкой стоимости в СССР органического топлива и высоких инвестиционных вложений на старте в ОРЦ-модули.

пользование дополнительного контура и котла-утилизатора, с помощью которого тепло передается в ОРЦ-модуль, что удорожает весь проект (табл. 1).

### Возможность реконструкции ГТУ

В проекте надстройки газовой турбины ГТ-6–750 утилизационной установкой по циклу SORC на изобутане в схему встраивается противодавленческая паровая турбина, отработавший пар которой служит энергоносителем для ОРЦ-модуля [4]. Температура выхлопных газов ГТУ до и после котла-утилизатора соответственно

<sup>1</sup> Например, дымовые газы от коксовых батарей, охлаждающий воздух линейных охладителей агломерационных машин, выхлопные газы газопоршневых, газотурбинных и других тепловых двигателей, а также невостребованные отборы пара паровых турбин и технологических процессов, как в [4].

**Таблица 1** Сводка данных о разработках\* систем на базе ОРЦ-модулей

Проект энергоустановки с ОРЦ-модулем на тепле	Устан. мощность ОРЦ, МВт	Капвложения в энергоустановку, млн руб.	Себестоимость		Срок окупаемости, лет
			Электроэнергии, руб./кВт·ч	Тепловой энергии, руб./Гкал	
Мини-ТЭЦ на щепе, Красноярский край	0,500	106,30	3,24	771	2,56
ТЭЦ:					
– на промышленном отборе пара,	9,400	481,00	0,33	–	2,79
– на тепле линейных охладителей,	4,430	1 427,90	0,76	–	8,80
– на тепле дымовых газов коксовых батарей,	22,200	1 553,00	0,56	–	3,80
– на тепле дымовых газов печей спекания,	1,210	69,40	0,57	185	2,66
– на сбросном технологическом паре	0,587	35,22	0,64	–	3,70

\* По данным НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания».

415 и 120 °С. Ожидаемые технико-экономические показатели после реконструкции ГТУ:

- увеличение электрической мощности с 6,00 до 9,45 МВт (ПГУ),
- рост КПД с 23 до 34,8% (блока),
- снижение температуры уходящих газов со 120 до 100 °С (ПГУ) при давлении и температуре изобутана в контуре 22,12 бар и 105 °С, а в агрегате воздушного охлаждения (АВО) – 3,04 бар и 20 °С, мощность изобутановой турбины 1,645 МВт.

Наиболее продвинутой разработкой в данной области – схема «паровая турбина противодавления (типа Р) – ОРЦ-

модуль» [2–4]. Поскольку КПД ОРЦ-цикла в диапазоне температур 250–270 °С выше КПД цикла на водяном паре примерно на 5%, с убыванием разницы по мере роста температуры, то в указанном температурном интервале эффективнее направлять пар в парогенератор контура ОРЦ, чем сбрасывать его в паровой турбине.

### Контур ОРЦ

Основные элементы контура ОРЦ: турбина на паре НКТ, парогенератор (испаритель), рекуператор, конденсатор и насосы – компонуются в одном блоке (модуле) в едином корпусе для перевозки в контейнере. Помимо этих узлов установка содержит в общем случае водяные подогреватели НКТ (один или несколько), экономайзер, инжекторы низкого (НД) и высокого (ВД) давления, подогреватель смешивающего струйного типа, БРОУ, размещаемые вне корпуса, в схеме установки.

**Таблица 2** Параметры АБХМ-4000В и АБТН-4000В и режимы работы

Показатели	Значения	
	АБТН, зима	АБХМ, лето
<b>Холодильный контур испарителя</b>		
Холодильная мощность $Q_{хол}$ , кВт	4 000	4 000
Температуры хладоносителя, вход/выход, °С	30/25, $\Delta = 5$	12/7, $\Delta = 5$
Расход воды $G_{воды}$ , (кг/с)/(т/ч)	191/687	191/687
<b>Контур генератора</b>		
Тепловая мощность $Q_{г}$ , кВт	5 600	5 600
Температуры теплоносителя, вход/выход, °С	150/140, $\Delta = 10$	115/105, $\Delta = 10$
Расход воды $G_{вод,г}$ , (кг/с)/(т/ч)	133/478	133/478
<b>Контур «конденсатор – абсорбер» (К-А)</b>		
Тепловая мощность $Q_{г}$ , кВт	10 200	9 550
Температуры энергоносителя, вход/выход, °С	60/90, $\Delta = 30$	27/35, $\Delta = 8$
Расход воды $G_{вод,к-а}$ , (кг/с)/(т/ч)	81,2/292	285/1 025

### Энергоустановки с ОРЦ на НКТ с включением в контур абсорбционного холодильного оборудования

Рассмотрим вопрос о возможностях, условиях и эффективности применения в энергоустановках ОРЦ на НКТ абсорбционного холодильного оборудования, причем за базу системы примем абсорбционный бромисто-литиевый транс-

форматор тепла (АБТТ), который может эксплуатироваться и как АБХМ, и как тепловой насос (АБТН).

Одноступенчатые абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы используются ввиду их явных преимуществ перед компрессионными [5]. Интерес к АБТТ вызван тем, что указанное оборудование служит и генератором холода для конденсатора контура ОРЦ-модуля, и источником тепла<sup>2</sup> в диапазоне температур коммунального теплоснабжения (отопление, ГВС)<sup>3</sup>. Таким образом, система генерации (электроэнергии) преобразуется в систему тригенерации с получением дешевой электрической и тепловой энергии, а также холода. Решение содержит ноу-хау.

Для примера представляем данные (табл. 2) для АБХМ-4000 В и АБТН-4000 В (ООО «ОКБ «ТЕПЛОСИБМАШ»), которые могут быть использованы в предлагаемой системе. Краткая справка о холодильных машинах и их эффективности, а также рекомендации даются в [5].

Как генератор среднетемпературного (до 90 °С) тепла АБТН в 1,65–1,75 раза экономичнее обычного топливного

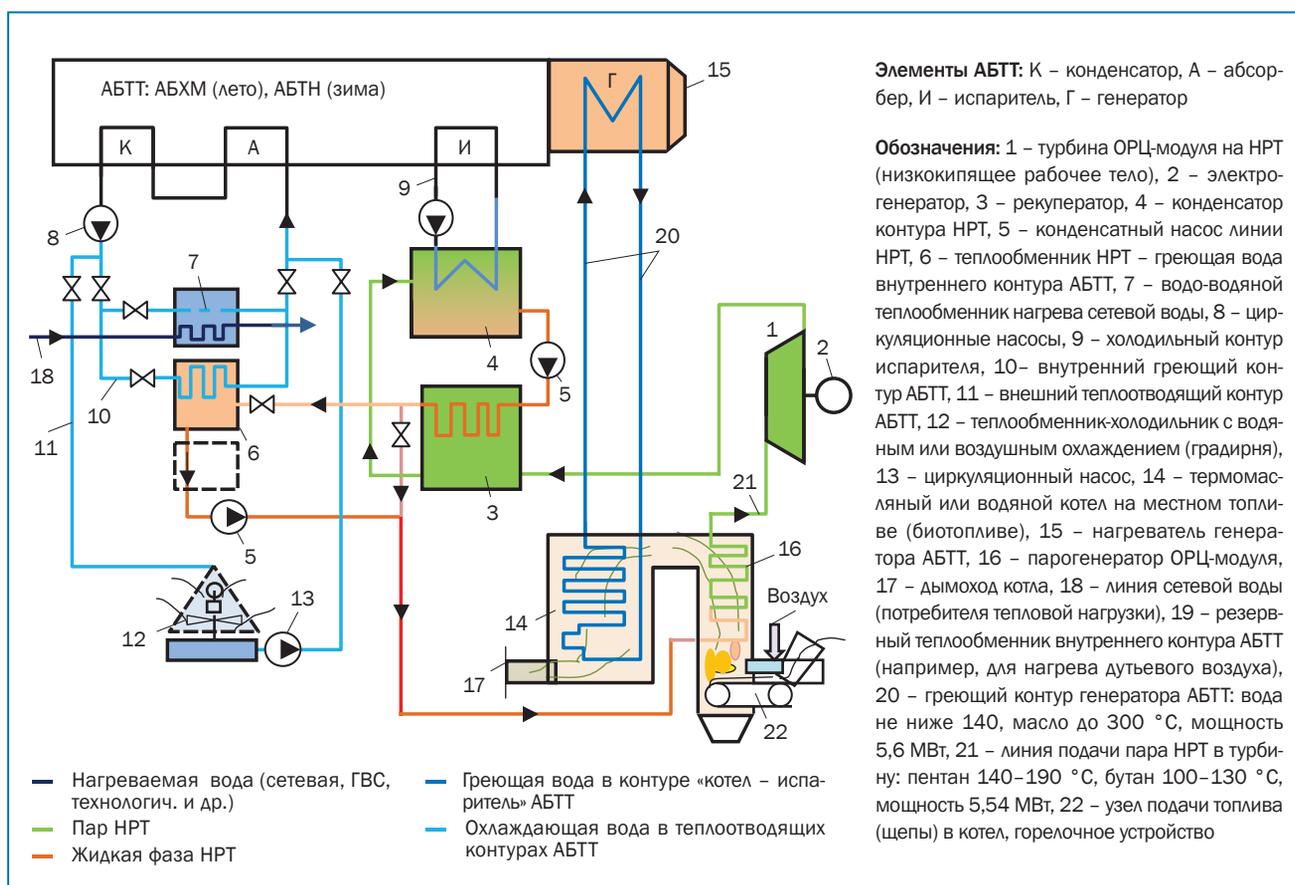
котла и имеет коэффициент использования топлива соответственно 165–175%. Пределы регулирования машин 0,3–1,2, настройки температур  $\pm 3-5$  °С.

Особенность АБТТ – большое количество отводимого тепла в контуре К-А, в нашем примере 10,2 МВт (табл. 2). Эффективность применения АБТН определяется возможностями и степенью утилизации этого тепла.

## ОРЦ-модуль для мини-ТЭЦ на щепе

В качестве расчетной модели для системы принят разработанный в [1] проект мини-ТЭЦ на щепе для поселка в Красноярском крае, который можно считать типичным для множества аналогичных объектов Севера и Северо-Востока России, где используется местное топливо (чаще всего – биотопливо). Оттуда взяты некоторые исходные данные.

В предлагаемой системе (рис.) ОРЦ-модуль содержит стандартный комплект: турбина 1 на НКТ с электрогенератором 2, парогенератор 16, нагревательные поверхности



**Рис. Принципиальная схема энергокомплекса: блок-модуль ОРЦ-АБТТ**

<sup>2</sup> Причем тепла практически дарового, полученного за счет утилизации теплоты конденсации паров НКТ в конденсаторе контура ОРЦ.

<sup>3</sup> Применение АБТТ в промышленных условиях для систем глубокой утилизации тепла продуктов сгорания показано в [5, 6], для станционной энергетики в [7].

которого встроены в термомасляный котел 14 на щепе, рекуператор 3 и конденсатор 4. Возможно применение и водогрейного котла с нагревом до 150 °С (например, отечественные котлы ПТВМ). Конденсатор 4 включен в замкнутый холодильный контур 9 АБТТ, в котором циркулирует вода с температурой 30/25 °С (вход/выход, табл. 2). Из рекуператора 3 конденсат поступает в парогенератор 16 либо, как вариант, на дальнейший нагрев горячей водой греющего контура 10 АБТН в теплообменник 6, вне корпуса ОРЦ-модуля.

Генератор 15 АБТТ подключен к замкнутому контуру 20 котла 14 с циркулирующим в нем теплоносителем (маслом либо водой).

Внешний теплоотводящий контур АБТТ «конденсатор – абсорбер» состоит из двух контуров: малого 10 и большого 11. В малом контуре циркулирует вода с температурой 60/90 °С (вход/выход, табл. 2), в него включены теплообменники 7 нагрева сетевой воды (теплоснабжение – отопление, ГВС, технологические нужды и пр.) и 6. Возможно подключение и третьего 19, например для нагрева дутьевого воздуха. Теплообменник 7 – подогреватель сетевой воды (ПСВ) – обслуживает тепловую сеть и ГВС поселка с температурным графиком работы (отопления) 90/60 °С. Для теплосети ограниченной протяженности этого вполне достаточно. Большой контур 11 замыкается на теплообменник-холодильник с водяным или воздушным охлаждением (градирню) 12.

С наступлением отопительного сезона АБТТ настраивают на работу в режиме теплового насоса. Включают малый контур 10, теплообменники 6 и 7 и отключают большой 11. В теплый период года, в отсутствие тепловой нагрузки, АБТТ переключают на режим АБХМ: включают большой теплоотводящий контур 11 с теплообменником-холодильником 12. Используется имеющаяся на объекте (станции) градирня (при наличии таковой). При работе АБХМ утилизация тепла контура К-А невозможна ввиду низких температур, и оно отводится в атмосферу. Отметим, что у АБТН более высокие требования к энергоносителю (табл. 2).

Если количество сбросного тепла АБТН превышает потребности внешнего потребителя, излишки сбрасывают в градирню.

На практике же, если ГВС функционирует постоянно, то система круглогодично эксплуатируется в режиме теплового насоса, под управлением единой САР<sup>4</sup> по оптимальной программе, т.е. работает АБТН, включены оба контура: 10 с теплообменниками и 11 с градирней.

Далее (порядок выбора может быть любым) необходимо выбрать сам ОРЦ-модуль, обеспечивающий согласованную работу системы АБТТ-4000 В – контур ОРЦ в общей технологической схеме.

## Экономика проекта

Рассчитанные по общепринятой методике с определением стандартных критериев технико-экономические и финансово-коммерческие показатели свидетельствуют о состоятельности идеи, конкурентоспособности проекта, эффективности решения.

### Исходные данные:

- теплопроизводительность термомасляных котлов (3 шт.) 12,12 Гкал/ч;
- тепловая мощность АБТТ-4000Т (тепловыделяющего контура) 10 МВт / 8,6 Гкал/ч;
- электрическая мощность ОРЦ-модуля (на отпуск электроэнергии) 1 060 кВт;
- КПД термомасляного котла 80 %;
- удельная теплотворная способность щепы 2 150 ккал/кг;
- стоимость: термомасляных котлов около 42 млн руб., АБТТ-4000Т 25 млн руб., модуля ОРЦ 83 млн руб., щепы 500 руб./т;
- тариф (для конкретных условий): на тепловую энергию 2 200 руб./Гкал, на электроэнергию 5,5 руб./кВт•ч;
- коэффициенты использования: тепловой мощности 0,6; электрической мощности 0,3.

### Результаты расчета эффективности проекта ТЭС:

- капитальные вложения в ТЭС 230,756 млн руб.;
- затраты: на амортизацию 10,133 млн руб., на оплату персонала 5,66 млн руб.;
- производственные издержки (без амортизации) 26,13 млн руб.;
- выработка электроэнергии 2,709 млн кВт•ч;
- отпуск тепла 32,52 тыс. Гкал/год;
- количество тепла, выделяемое щепой в топке котла, 56,317 Гкал/год;
- потребление щепы 26 194 т/год;
- годовые затраты: на приобретение щепы 13,092 млн руб., эксплуатационные 9,75 млн руб.;
- себестоимость: электроэнергии 2,8 руб./кВт•ч, тепловой энергии 417,7 руб./Гкал;
- чистый дисконтированный доход (NPV) 407 089 тыс. руб.;
- внутренняя норма доходности (IRR) 42,6 %;
- индекс доходности (PI) 6,4;
- срок окупаемости (PP) и дисконтированный срок окупаемости (DPP) составляют по 4 года.

Итак, при общей стоимости строительства ТЭС с нуля 231 млн руб. себестоимость электрической и тепловой

<sup>4</sup> Система автоматического регулирования всего комплекса «энергообъект – внешний потребитель тепла».

