



Выпуск 5, 2012

ЭНЕРГЕТИКА **за рубежом**

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК

Тенденции применения низкокипящих рабочих тел. Применение пентана, утилизация тепла, снижение стоимости электрической энергии

В Европе и Северной Америке, где стоимость энергоносителей гораздо дороже, чем в России, сложился совершенно иной подход к утилизации тепла от любых промышленных источников. На сегодняшний день там накоплен большой опыт строительства компрессорных станций с надстройками, использующими тепло выхлопных газов. В одном из выпусков журнала *Diesel & Gas Turbine Worldwide* опубликована статья, подробно рассказывающая о работе таких установок на одном из самых длинных (2010 км) газопроводов США «Northern Border Pipeline» (рис. 1).

Компрессорные станции названного газопровода оснащены теплоутилизационными установками ORMAT® ENERGY CONVERTER (OEC). Высокая эффективность этих установок обусловлена использованием в качестве рабочего тела в тепловом контуре пентана. Для поддержания давления на газопроводе построены 17 компрессорных станций, из которых 11 станций имеют привод от газо-

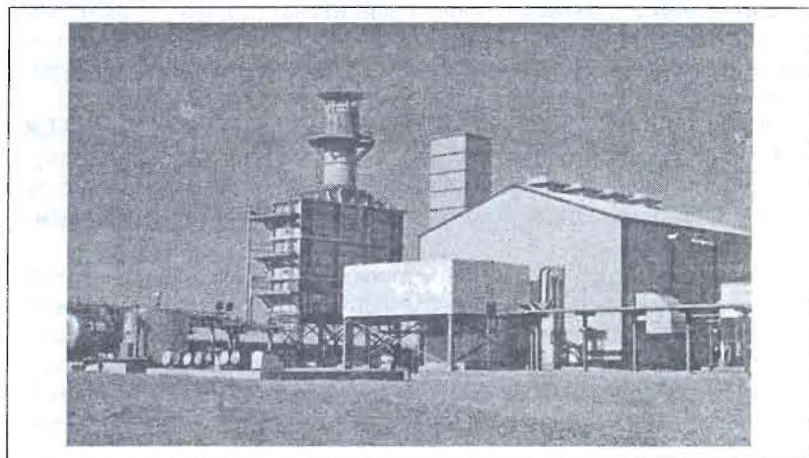


Рис. 1. Компрессорная станция № 11 газопровода «Northern Border Pipeline», оснащённая утилизатором тепла

турбинных установок (ГТУ) Rolls-Royce RB211 мощностью 28 МВт, две станции – от ГТУ Rolls-Royce Avon мощностью 16 МВт, четыре компрессорные станции оснащены электроприводом.

Газотурбинная установка Rolls-Royce RB211 имеет паротурбинную установку (ПТУ), расход газа на выходе из ГТУ равен 91,3 кг/с. В установке реализован двухвальный принцип, что обеспечивает асинхронную частоту вращения турбины и генератора. Температура уходящих газов близка к 510 °С. Максимальный коэффициент полезного действия установки достигает 37,2 %, она потребляет 167 – 198 тыс. м³ газа в день.

Компрессорные станции на базе ГТУ Rolls-Royce RB211 оснащены турбинными надстройками, которые построила и эксплуатирует компания Ormat Technologies*. В основе работы установки лежит органический цикл Ренкина. В отличие от классического цикла Ренкина, где в качестве рабочего тела используется пар, здесь применяется органический газ пентан (C₅H₁₂).

При использовании источников низкопотенциального тепла физические свойства пентана (низкая температура кипения, повышенная теплоёмкость) делают его применение, в качестве рабочего тела, более экономически выгодным по сравнению с паром. Это позволяет создавать высокоэффективные энергетические комплексы для утилизации тепла в промышленности, геотермальной энергетике, солнечной энергетике.

Если сравнить циклы Ренкина для пентана и пара в *T-S* диаграммах (температура-энтропия) можно заметить, что при использовании первого из них цикл происходит при более низких температурах и меньших затратах теплоты (рис. 2).

Утилизационная установка ORMAT® ENERGY CONVERTER (ОЕС) в качестве рабочего тела использует пентан, который циркулирует в двух независимых контурах. В жидком состоянии (когда рабочее тело охлаждается и сжимается) пентан приобретает форму минерального масла.

Весь процесс (рис. 3) начинается в первом контуре с нагрева масла в котле-утилизаторе, куда поступают выхлопные газы турбины (при температуре около 500 °С). Температура кипения пентана сравнительно низка (36,1 °С при нормальных условиях), поэтому в котле-утилизаторе он быстро переходит в газообразное состояние, после чего, имея температуру около 260 °С, направляется в испаритель.

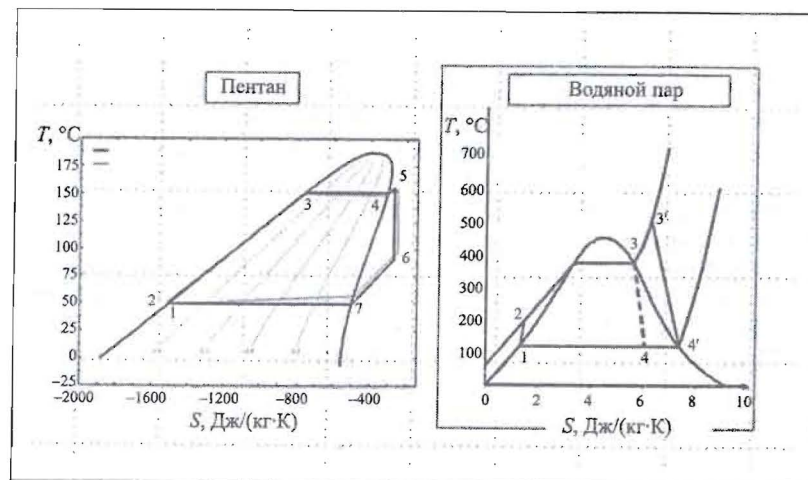


Рис. 2. Циклы Ренкина для пентана и пара в *T-S* диаграмме

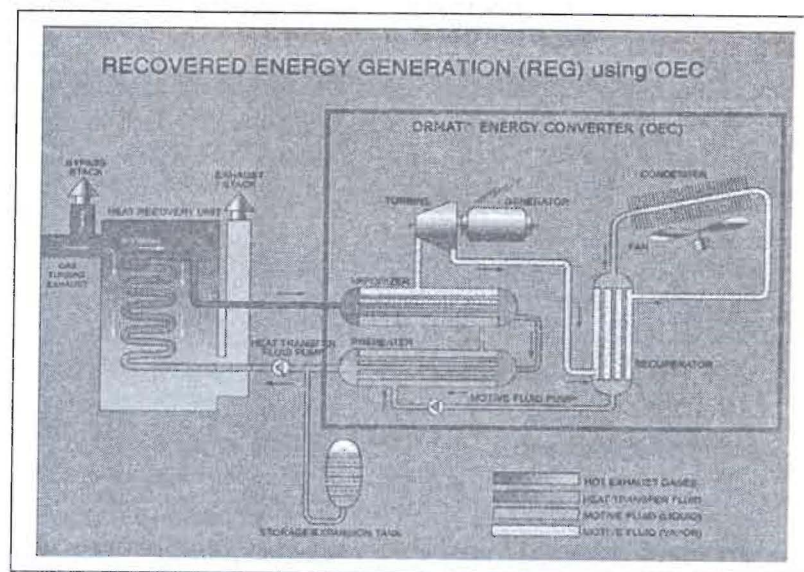


Рис. 3. Схема работы установки для утилизации низкопотенциального тепла компании Ormat-Technologies

* www.ormat.com

В испарителе достигается кипение и происходит перегрев пентана, циркулирующего во втором контуре. Пентан второго контура поступает в испаритель предварительно подогретым в подогревателе низкого давления. Из испарителя пентан первого контура с температурой около 200 °С направляется в турбину, а пентан первого контура — в подогреватель низкого давления.

Процесс настроен таким образом, что в турбине не происходит конденсации пентана в ходе срабатывания теплоперепада. На выходе из турбины пентан имеет температуру около 40 °С, его температура снижается сначала в рекуператоре, а затем в воздушном конденсаторе охлаждаемом вентиляторами.

После конденсатора в жидком состоянии пентан начинает подогреваться сначала в рекуператоре, затем в подогревателе низкого давления и наконец, в испарителе.

Модель процесса. По расчётам коэффициент полезного действия процесса составляет 18 %. То есть эффективность использования теплоты природного газа на компрессорной станции с учетом газотурбинной установки достигает 55,2 %.

При работе совместно с одной ГТУ Rolls-Royce RB211 мощностью 28 МВт установка ОЕС обеспечивает получение 6,5 МВт элек-

трической мощности. На собственные нужды установки (насосы, вентиляторы, система управления и пр.) необходимо 0,8 МВт мощности. Таким образом, 5,7 МВт может быть выдано в сеть либо использовано на нужды компрессорной станции. Суммарно на четырех компрессорных станциях газопровода получили в результате 62,7 МВт дешёвой электрической мощности.

Среди преимуществ использования установок ОЕС выделяют уменьшенные размеры и пониженную металлоёмкость конструкции по сравнению с вариантом паротурбинной установки. Такой эффект вызван меньшим, по сравнению с паром, удельным объёмом пентана. В результате появляется возможность для применения уменьшения по размеру и металлоёмкости, а, следовательно, более дешёвых, турбин, трубопроводов и конденсаторов (рис. 4).

Кроме того, использование вентиляторного охлаждения в органическом цикле Ренкина более эффективно, конденсация происходит при давлении, близком к атмосферному. Это важно в условиях недостатка либо полного отсутствия питательной и охлаждающей воды (которая потребовалась бы при работе паротурбинной установки) на компрессорных станциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diesel & Gas Turbine Worldwide. 2008.
2. Боярский М. Ю., Никольский А. И. и др. Сопоставление характеристик рабочих тел в низкотемпературных паротурбинных циклах // Труды Международного геотермального семинара «Энергия без дыма», 2003.
3. Сапожников М. Б., Тимошенко Н. И. Термодинамический анализ паротурбинных циклов с низкикипящими рабочими телами // Деп. в ВИНТИ 11.02.2005 № 200.

ЛОГИНОВА Е. А., Санкт-Петербургский Государственный технологический университет растительных полимеров;
alelal777@yandex.ru

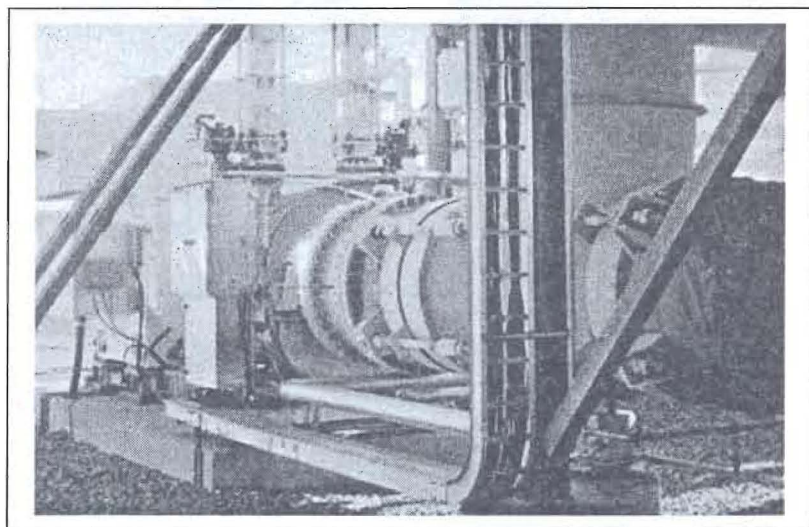


Рис. 4. Турбина, использующая в качестве рабочего тела пентана, вместе с генератором