

УДК 62-176.2

*Потапов А.А.*

*к.ф.-м.н., доцент кафедры ПЭС*

*Гафуров А.М.*

*инженер I категории УНИР*

*ФГБОУ ВО «КГЭУ»*

*Россия, г. Казань*

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА CO<sub>2</sub> ДЛЯ ВЫРАБОТКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ПАРОВОЙ  
ТУРБИНЫ ТИПА К-1200-240**

*Представлены результаты исследования способа работы низкотемпературного теплового двигателя на сжиженном CO<sub>2</sub> по выработке электроэнергии в составе конденсационной паровой турбины типа К-1200-240 при температуре окружающей среды до минус 50°С.*

*Ключевые слова: паровая турбина, низкотемпературный тепловой двигатель, сжиженный углекислый газ.*

*Potapov A.A.*

*candidate of physico-mathematical sciences*

*assistant professor of department «industrial electronics and lighting»*

*Gafurov A.M.*

*engineer of the I category «Management of research work»*

*«KSPEU»*

*Russia, Kazan*

**POSSIBILITIES OF USE OF THE LOW-TEMPERATURE HEAT ENGINE  
ON CO<sub>2</sub> FOR ELECTRICITY PRODUCTION AS A PART OF A  
CONDENSATION TURBINE K-1200-240**

*Results of research of mode of work of the low-temperature heat engine are presented on the liquefied CO<sub>2</sub> for electricity production as a part of the condensation turbine K-1200-240 at ambient temperature to minus 50°C.*

**Keywords:** *steam turbine, low-temperature heat engine, liquefied carbon dioxide gas.*

Развитие паротурбиностроения в настоящее время характеризуется увеличением единичных мощностей паровых турбин, повышением их надежности, экономичности и маневренности. Успешное освоение производства и внедрение в эксплуатацию серии паровых турбин мощностью 300, 500 и 800 МВт на сверхкритические параметры пара явилось предпосылкой создания и изготовления самой мощной отечественной паровой турбины типа К-1200-240 на производственном объединении турбостроения Ленинградском металлическом заводе (ЛМЗ, входит в состав «Силовые машины»).

Паровая турбина типа К-1200-240 ЛМЗ (номинальной мощностью 1200 МВт и начальными параметрами пара: давление 23,5 МПа и температура 540°C) представляет собой одновальный пятицилиндровый агрегат, состоящий из цилиндра высокого давления, двух-поточного цилиндра среднего давления и трех двух-поточных цилиндров низкого давления. Данная паровая турбина предназначена для выработки электроэнергии со значительным расходом (до 596 кг/с) пара в конденсатор (выпуск отработавшего пара производится в шесть потоков), где поддерживается низкое давление пара равное 3,0 кПа, что соответствует температуре насыщения в 24,08°C [1].

Известно, что процесс конденсации 1 кг пара сопровождается высвобождением скрытой теплоты парообразования (ранее затраченная на испарение) равная примерно 2200 кДж/кг, которая в настоящее время отводится с помощью охлаждающей воды в окружающую среду. Поэтому для большинства конденсационных паровых турбин потери теплоты в

холодном источнике (конденсаторе) могут составлять до половины (45-50%) затрачиваемой теплоты в термодинамическом цикле [2].

Особенностью конденсационных паровых турбин является возможность повышения их тепловой экономичности за счет усовершенствования той части тепловой схемы, которая относится к использованию теплоты отработавшего в турбине пара. В настоящее время проводятся исследования и разработки новых энергоэффективных систем охлаждения конденсаторов паровых турбин для экономии электроэнергии на собственные нужды станции. Предлагаются варианты использования вместо воды низкокипящего теплоносителя, который испаряется в поверхностном конденсаторе паровой турбины, расширяется в турбодетандере и конденсируется затем в охладительной башне, где теплота конденсации передается наружному воздуху [3, 4].

Учитывая суровые климатические условия России и продолжительность зимнего периода времени появляется возможность осуществления низкотемпературных термодинамических циклов с использованием низкокипящих рабочих тел.

Например, в зимний период времени конденсаторы паровых турбин типа К-1200-240 ЛМЗ являются источниками сбросной низкопотенциальной теплоты с температурой в  $24,08^{\circ}\text{C}$ , а окружающая среда – прямой источник холода с допустимой температурой вплоть до минус  $50^{\circ}\text{C}$ . Имеющийся теплоперепад можно сработать с помощью низкотемпературного теплового двигателя с замкнутым контуром циркуляции на низкокипящем рабочем теле [5].

Таким образом в зимний период времени предлагается использовать низкотемпературный тепловой двигатель в составе конденсационной паровой турбины типа К-1200-240 ЛМЗ, где реализуется термодинамический цикл Ренкина на основе парового контура с отводом теплоты в холодном источнике (конденсаторе) второму контуру на низкокипящем рабочем теле –

углекислом газе  $\text{CO}_2$ . Причем охлаждение низкокипящего рабочего газа  $\text{CO}_2$  будет осуществляться наружным воздухом окружающей среды при температуре от  $0^\circ\text{C}$  до минус  $50^\circ\text{C}$ .

Использование воздушных конденсаторов позволяет решить такие проблемы, как привязка электростанции к источнику охлаждающей воды, либо затраты на строительство прудов-охладителей, исключает необходимость установки и эксплуатации водозаборных и водоочистных сооружений. С экологической точки зрения воздушные конденсаторы дают возможность избавиться от теплового загрязнения водоемов, негативно сказывающегося на обитающих в них организмах.

Способ работы низкотемпературного теплового двигателя на  $\text{CO}_2$  осуществляется следующим образом. Отработавший в паровой турбине влажный пар (2%-10%) при давлении в 3,0 кПа охлаждается и конденсируется на поверхности конденсаторных трубок, внутри которых протекает охлаждающая жидкость. В качестве охлаждающей жидкости используется сжиженный углекислый газ  $\text{CO}_2$ , который сжимают в насосе до высокого давления и направляют в теплообменник-конденсатор паровой турбины типа К-1200-240 ЛМЗ для охлаждения отработавшего в турбине влажного пара. Конденсация 596 кг/с пара сопровождается выделением скрытой теплоты парообразования равного примерно 1285 МВт, которая отводится на нагрев и испарение сжиженного газа  $\text{CO}_2$  до температуры перегретого газа в  $19^\circ\text{C}$ . На выходе из конденсатора паровой турбины полученный перегретый газ  $\text{CO}_2$  направляют в турбодетандер, где в процессе расширения газа происходит снижение его температуры и давления, а мощность на валу турбодетандера передается соединенному на одном валу электрогенератору. После турбодетандера газообразный  $\text{CO}_2$  направляют в теплообменник-конденсатор воздушного охлаждения, где в процессе охлаждения газообразного  $\text{CO}_2$  ниже его температуры насыщения

происходит процесс интенсивного сжижения, после чего сжиженный газ направляют в насос и цикл повторяется [6].

На рис. 1, 2 представлены графики расчетных показателей по выработке (потреблению) полезной электрической мощности низкотемпературным тепловым двигателем и абсолютного электрического КПД турбогенератора при осуществлении процесса охлаждения конденсаторов паровых турбин типа К-1200-240 ЛМЗ контуром циркуляции на  $\text{CO}_2$  в зависимости от температуры наружного воздуха в зимний период времени.

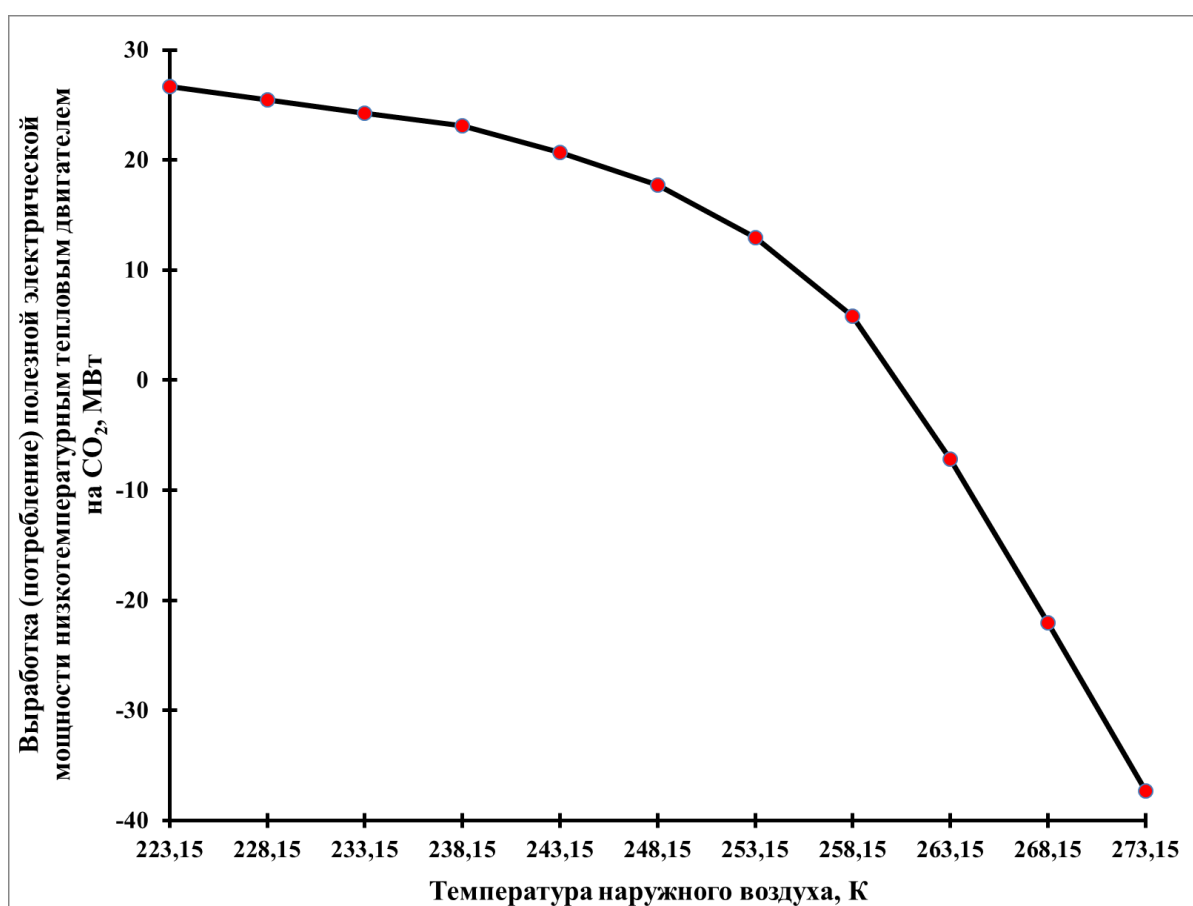


Рис. 1. Для турбин К-1200-240 с расходом пара в конденсатор 596 кг/с.

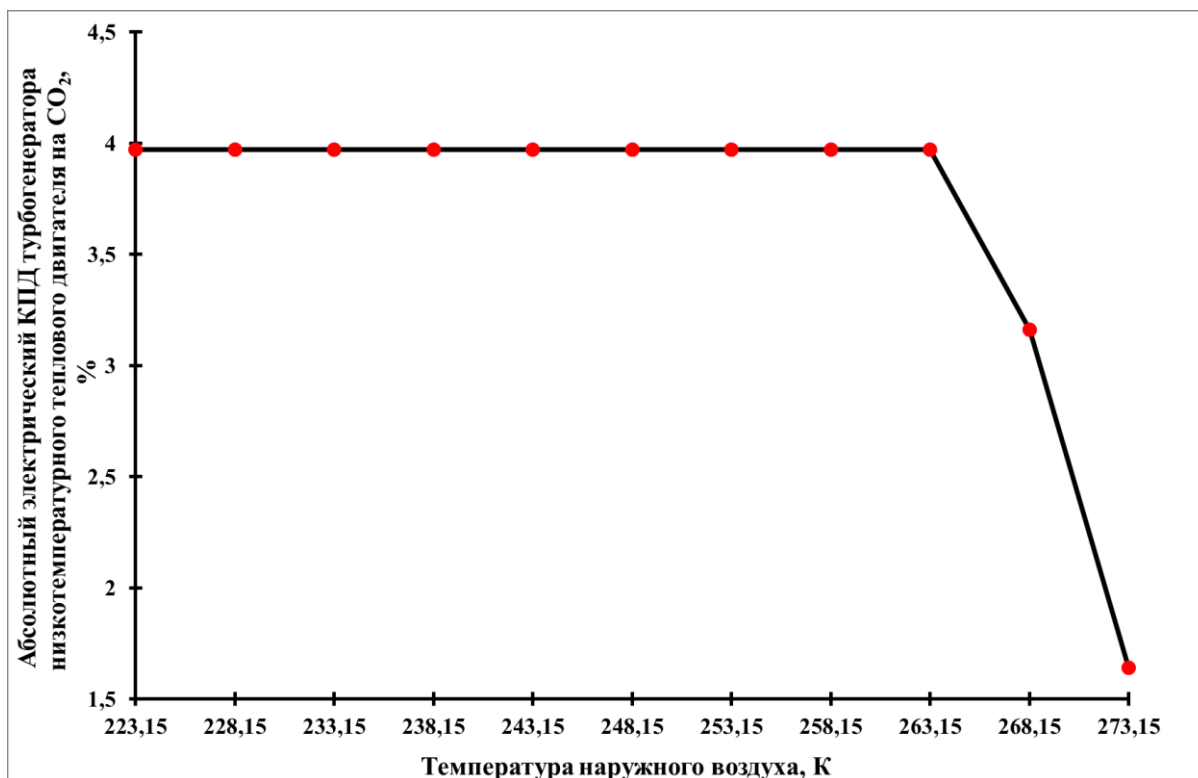


Рис. 2. Для турбин К-1200-240 с расходом пара в конденсатор 596 кг/с.

Абсолютный электрический КПД (рис. 2) турбогенератора низкотемпературного теплового двигателя варьируется от 1,64% до 3,97%. При этом использование низкотемпературного теплового двигателя с замкнутым контуром циркуляции на CO<sub>2</sub> в составе конденсационной паровой турбины типа К-1200-240 ЛМЗ позволяет дополнительно вырабатывать электроэнергию на станции (рис. 1) в диапазоне температур окружающей среды от 258,15 К (-15°C) до 223,15 К (-50°C).

### **Использованные источники:**

1. Клименко А.В., Зорин В.М. Тепловые и атомные электростанции: Справочник. Книга 3. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 648 с.
2. Бродов Ю.М. Теплообменники энергетических установок. Учебное пособие. – Екатеринбург. Издательство «Сократ», 2003. – 965 с.
3. Патент на изобретение № 2555597 РФ. Способ работы тепловой электрической станции / Гафуров А.М. 10.07.2015 г.
4. Патент на изобретение № 2555600 РФ. Способ работы тепловой электрической станции / Гафуров А.М. 10.07.2015 г.
5. Гафуров А.М., Гафуров Н.М. Перспективы применения бинарных энергоустановок на тепловых электростанциях России. // Форум молодых ученых. – 2017. – №5 (9). – С. 509-512.
6. Зайнуллин Р.Р., Гафуров А.М. Осуществление бинарного цикла в составе мощной конденсационной паровой турбины типа К-1200-240-3 ЛМЗ, охлаждаемого водой при температуре 5°C. // Форум молодых ученых. – 2017. – №5 (9). – С. 799-802.