



УДК 536:24

А. А. Редько

Термодинамическая эффективность процессов преобразования низкопотенциальной теплоты в энергетических установках с органическим теплоносителем

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Л. Шубенко)

Исследуются процессы преобразования низкопотенциальной теплоты в электроэнергию в паросиловых установках. Приведены численные результаты и анализ цикла Ренкина с разными органическими веществами. Показано влияние характеристик рабочих веществ, структуры тепловой схемы энергетических установок, эффективности процессов преобразования в зависимости от температурного (энтальпийного) потенциала теплоты.

Одним из направлений использования теплоты уходящих газов топливоиспользующих технологических агрегатов является генерация электроэнергии и последующее применение ее в технологическом производстве (привод насосов, вентиляторов, компрессоров и т. д.). Однако эта проблема изучена недостаточно из-за сложности термодинамических процессов преобразования теплоты потока продуктов сгорания, температурный (энтальпийный) потенциал которых изменяется от 120 до 350 °С.

Формулирование проблемы. Рассмотрим процессы преобразования теплоты топливоиспользующего источника (промышленные печи металлургического производства, компрессорные станции магистральных газопроводов, стекловаренные печи, котельные установки и др.) с температурой удаляемых газов 120–350 °С. Объемы вторичных энергоресурсов, которые могут быть использованы и преобразованы, составляют десятки МВт тепловой энергии. Однако для всего температурного диапазона удаляемых продуктов сгорания отсутствует универсальная тепловая схема энергетической паросиловой установки и не могут быть в настоящее время определены (рекомендованы) эффективные рабочие теплоносители.

В известных работах [1–3] исследовались различные рабочие вещества (вода и водоаммиачные смеси, диоксид углерода, фреоны). В [3–6] приводятся результаты исследований

© А. А. Редько, 2013

процессов преобразования теплоты в энергетических установках с органическими веществами. Появление искусственно синтезированных озонобезопасных хладонов, не содержащих хлор и бром, открывает определенные перспективы. Перспективным также является замена цикла Ренкина на треугольный цикл [7], обеспечивающий минимальный перепад температур между теплоносителями. Исследования [2, 5, 6] указывают на перспективность использования смесей органических веществ и, особенно, при сверхкритических параметрах. При этом эффективными являются двухступенчатые и каскадные циклы энергетических установок, трансформирующих теплоту как в теплонасосных агрегатах, так и в паросиловых установках.

Целью данной работы является численное исследование процессов преобразования низкопотенциальной теплоты в широком температурном диапазоне (120–350 °С) источников теплоты — потоков удаляемых продуктов сгорания топливоиспользующих установок и агрегатов.

Основные результаты и их анализ. Ниже приводятся результаты исследований докритических (цикл Ренкина) и сверхкритических (треугольный цикл) циклов энергетических установок как одноступенчатых, так и каскадных. В качестве рабочих теплоносителей изучались рабочие вещества R600, R600a, R601a, R602, R13в, R134a, R142в, R143a, R404a, R407a, R410a, R503в, R600a/R161, R600a/R141; R600a/R601, NH₃/R170 и другие органические вещества и их смеси.

Термодинамическая эффективность циклов определяется термическим КПД циклов или коэффициентом термомеханического преобразования (COP — coefficient of Performance), а также эксэргетическим КПД (коэффициентом утилизации). Термический КПД (или COP) определяется согласно выражению:

$$\eta_t = \frac{W_{\text{пол}}}{Q_{2-3}} = \frac{l_{3,4} - l_{1,2}}{Q_{2-3}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{пол}}$ — полезная работа цикла; $l_{1,2}$, $l_{3,4}$ — соответственно работа адиабатического сжатия и расширения в насосе и турбине в обратимом процессе; Q_{2-3} — количество теплоты, подведенное в испарителе в изобарном процессе: $Q_{2-3} = m(i_3 - i_2)$.

Работа повышения давления, выполняемая насосом, равняется:

$$l_{1,2} = m(i_2 - i_1) = \frac{m(i_{2S} - i_1)}{\eta_n}, \quad (2)$$

где m — расход рабочего вещества; состояния 2 и 2S соответствуют реальному процессу и изоэнтропному; η_n — действительный КПД насоса.

Работа расширения пара в турбине определяется согласно выражению:

$$l_{3,4} = m(i_3 - i_4) = \eta_T m(i_3 - i_{4S}), \quad (3)$$

где η_T — действительный КПД турбины; состояния 4 и 4S соответствуют реальному и изоэнтропному процессам.

Эксэргетический КПД, или коэффициент утилизации, определяется как отношение действительной полезной мощности установки к максимальной теоретической мощности, которую можно получить от охлаждения продуктов сгорания:

$$\eta_e = \frac{W_{\text{пол}}}{m_{\text{пр. сг}}[(i - i_0) - T_0(S - S_0)]}, \quad (4)$$

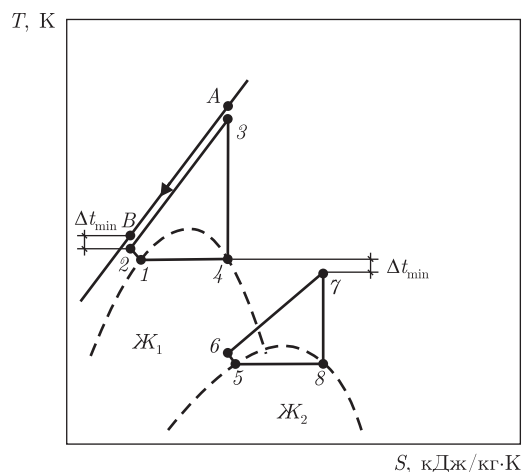


Рис. 1. Термодинамические циклы в каскадной энергетической установке с двумя жидкостями (AB — процесс охлаждения потока продуктов сгорания; $1-4$ — сверхкритический цикл (верхний каскад) первой жидкости; $5-8$ — сверхкритический цикл (нижний каскад) второй жидкости)

где $m_{пр.сг}$ — расход продуктов сгорания теплогенератора; i, i_0, S, S_0 — соответственно энтальпия и энтропия продуктов сгорания при температуре на входе в установку и при температуре окружающей среды; T_0 — температура окружающей среды.

Термический КПД цикла (или COP) изменяется в узком диапазоне 0,13–0,16, что недостаточно характеризует эффективность циклов и поэтому более показательным критерием выбора рабочего вещества является работа, получаемая при расширении пара в турбине.

Расчеты выполнялись при следующих допущениях: перепад температур между продуктами сгорания и рабочими веществом $\Delta t_{min} = 3; 5$ °С (рис. 1); КПД турбины — 0,7–0,8; КПД насоса 0,75–0,80; процесс расширения пара в турбине завершается в однофазной области; конденсация пара после турбины происходит в воздушном конденсаторе; температура атмосферного воздуха 15 °С (288,15 К).

В результате исследования и оптимизации циклов со многими рабочими веществами как в докритическом, так и в сверхкритическом цикле в одноступенчатой энергетической установке было установлено, что максимальная выработка электроэнергии обеспечивается в сверхкритическом цикле. Циклы каскадной энергетической установки приведены на рис. 1. Результаты показывают, что для котла КВ-ГМ-50 при расходе продуктов сгорания 27 кг/с, температуре пара рабочего вещества в утилизационной энергетической установке (200–250 °С) и использовании в качестве теплоносителей смесей углеводородов (R600a-iC₈H₁₀, R161, R141в и др.) вырабатываемая полезная мощность в докритическом цикле (давление рабочего вещества 2500 кПа) составляет 581,72 кВт, в окологкритическом цикле (давление 3700 кПа) — вырабатываемая мощность 723,62 кВт, в сверхкритическом цикле (давление 6000 кПа) — вырабатываемая мощность 1789,34 кВт. Однако температурный потенциал рабочего вещества в одноступенчатых установках используется недостаточно эффективно, так после расширения в турбине температура пара ($t_{п}$ перед турбиной — 200 °С) остается высокой 90–110 °С и выше, а при $t_{п} = 350$ °С после расширения равна 200–250 °С. Использование каскадной тепловой схемы позволяет обеспечить более глубокое снижение температуры рабочего вещества [6].

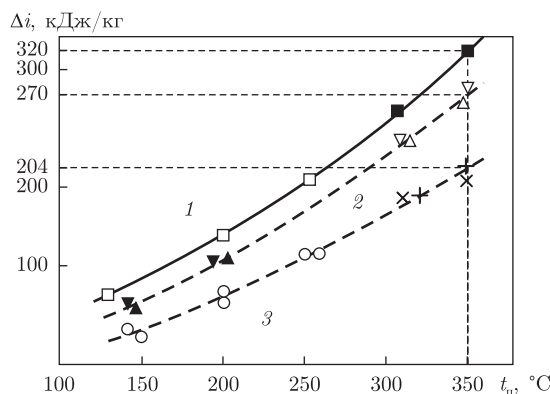


Рис. 2. Значение изменения удельной энтальпии пара в турбине в зависимости от температуры пара перед турбиной в каскадных энергетических установках с различными теплоносителями: 1 — трехступенчатая установка (■ — R601a, $iC_4H_{10}+R161$, R134a; □ — R143a, R410a, R134a); 2 — двухступенчатая (▼ — изобутан + изопентан; ▲ — R142в; $iC_4H_{10} + R141в$, н-пентан; ▽ — R601a + $iC_4H_{10}/R161$; △ — R602 + $iC_4H_{10}/R161$); 3 — одноступенчатая (⊗ — $iC_4H_{10} + R161$; ⊕ — $iC_4H_{10} + R141в$; + — R602 -; × — R601a)

Результаты численных исследований показывают также (табл. 1), что в каскадной энергетической установке возможна генерация электрической мощности на 17–25% выше, чем в одноступенчатой энергетической установке. При этом обеспечивается увеличение коэффициента использования теплоты уходящих газов до 0,90–0,92, значение коэффициента термомеханического преобразования (COP) составляет 0,17–0,24. В каскадных энергетических установках существенно снижаются затраты мощности на повышение давления рабочего вещества в насосах.

Анализируя результаты, представленные на рис. 2, видим, что при температуре уходящих газов топливоиспользующего промышленного агрегата 350 °C удельный перепад энтальпии пара составляет около 270 кДж/кг для двухступенчатых установок и около 320 кДж/кг — для трехступенчатых установок. В [4] приведены данные о значении перепада энтальпии в одноступенчатой н-пентановой турбине около 200 кДж/кг. Эффективность рабочего вещества оценивалась также по значению полной эксергии потока перед турбиной. Эксергия потоков рабочих веществ — смесей R600a/R161, R600a/R141в, R600a/н-ге-

Таблица 1. Значение параметров каскадных энергетических установок

Рабочее вещество	$t_{3,7}$, °C	$t_{4,8}$, °C	$P_{3,7}$, кПа	$P_{4,8}$, кПа	m , кг/с	Δi , кДж/кг	W , кВт/(кг/с)	COP/ η_e
			Верхний каскад установки					
R601a	347	255,6	6000	92	0,53	190	98,4	—
			Нижний каскад установки					
$iC_4H_{10}/R161$	252,6	194,6	6000	1200	0,36	79	28,9	0,20/0,95
			Верхний каскад установки					
R602	347	237	6000	20	0,53	200	109,2	—
			Нижний каскад установки					
$iC_4H_{10}/R161$	234	174	6000	1200	0,35	75	26,4	0,22/0,95

Примечание. $t_{3,7}$ — температура пара перед турбиной каскадов; $t_{4,8}$ — температура пара после турбины; $P_{3,7}$, $P_{4,8}$ — давление пара соответственно до и после турбин каскадов; m — расход рабочего теплоносителя; Δi — изменение удельной энтальпии пара; W — удельная вырабатываемая мощность; COP, η_e — соответственно коэффициенты преобразования и утилизации.

ксан в сверхкритических циклах при температуре, например, 197 °С составляет 137,1–106 кДж/кг, что для котла КВ-ГМ-50 при $m = 27$ кг/с обеспечивает выработку электрической мощности 1619,7–1789,3 кВт, в 1,5–2,0 раза выше, чем в турбине с водяным паром.

Таким образом, в результате численного исследования процессов преобразования низкопотенциальной теплоты в электроэнергию показана возможность повышения термодинамической эффективности процессов в каскадных энергетических установках с несколькими органическими теплоносителями, критическая температура которых понижается в каждом каскаде.

1. *DiPirro R.* Geothermal power plants: principles, applications and case studies. – Oxford: OX51GB, 2005. – 450 p.
2. *Алхасов А. Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологи. – Москва: Физматлит, 2008. – 376 с.
3. *Редько А. А.* Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения. – Макеевка: ДонНАСА, 2010. – 302 с.
4. *Пятничко В. А.* Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 5. – С. 10–14.
5. *Артемченко С. В., Никитин Д. Н.* Выбор рабочих тел для низкотемпературных циклов Ренкина на органических веществах. II. Фторированные эфиры // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – № 1(123). – С. 6–10.
6. *Редько А. А.* Рациональные термодинамические параметры циклов многоступенчатой геотермальной станции // Пробл. машиностроения. – 2010. – 13, № 4. – С. 76–82.
7. *Зысин В. А.* Комбинированные парогазовые установки и циклы. – Москва: Госэнергоиздат, 1962. – 185 с.

Харьковский национальный университет
строительства и архитектуры

Поступило в редакцию 17.09.2012

А. О. Редько

Термодинамічна ефективність процесів перетворення низькопотенційної теплоти в енергетичних установках з органічним теплоносієм

Досліджуються процеси перетворення низькопотенційної теплоти в електроенергію в паросилових установках. Наведено числові результати та аналіз циклів Ренкіна з різними органічними речовинами. Показано вплив характеристик робочих речовин, структури теплової схеми енергетичних установок, ефективності процесів перетворення залежно від температурного (ентальпійного) потенціалу теплоти.

A. A. Redko

Thermodynamic efficiency of conversion processes of low-grade heat in power plants with organic coolant

We study the processes of transformation of low-temperature heat into electricity at steam power plants. Numerical results and the analysis of the Rankine cycle with various organic substances are presented. The role of the characteristics of a working substance, structure of thermal circuits of power plants, and the dependence heat capacity of the efficiency of conversion processes on the temperature (enthalpy) heat capacity are presented.