

Особенности применения ОЦР-технологии на компрессорных станциях металлургических предприятий

И. С. Антаненкова^{1,*}, С. И. Светогор^{2,*}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²ООО «ВР-Ресурс», Щелково, Россия

Аннотация

Использование вторичных энергетических ресурсов в металлургии с превращением их в механическую и/или электрическую энергию позволяет не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и существенным образом увеличить энергоэффективность объектов.

В результате проведенного расчетного исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, определен потенциал энергосбережения на компрессорной станции металлургического предприятия (на примере системы снабжения техническими газами процесса получения стального проката из железной руды ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»). Предложены и обоснованы схемное решение и методика определения параметров работы установки, работающей по так называемому «органическому циклу Ренкина» (ОЦР-установки), позволяющей получить дополнительную электрическую энергию для нужд производства за счет утилизации теплоты межступенчатого охлаждения компрессорных установок. Выявлены особенности реализации данной технологии, предложено к внедрению рабочее вещество ОЦР-установки, максимально соответствующее требованиям безопасности и энергетической эффективности. Оценены значения внутреннего КПД, мощности ОЦР-установки и доли полезно утилизируемой теплоты при реализации предложенной схемы.

Ключевые слова

Органический цикл Ренкина, энергосбережение, металлургия, центробежный компрессор, межступенчатое охлаждение, низкокипящее рабочее вещество, R245fa

Актуальность работы

Одно из хорошо известных решений в области энергосбережения на предприятиях металлургической промышленности – сокращение расходов на тепло- и энергоснабжение за счет использования автономных генерирующих мощностей, в том

числе, за счет увеличения доли утилизации вторичных энергетических ресурсов [1-3]. Неоспоримыми преимуществами по сравнению со всеми предлагаемыми энергосберегающими мероприятиями для утилизации низкопотенциальной энергии (жидкостей с температурой менее 100 °С и

* Для переписки

Email addresses: antanenkovais@mail.ru, s.svetogor@vrrs.ru

газов с температурой ниже 300 °С) обладает технология органического цикла Ренкина (ОЦР-технология):

возможность длительного простоя оборудования при отрицательных температурах;

замкнутый цикл без необходимости химической обработки рабочего тела;

отсутствие проблемы коррозии в связи с использованием неагрессивных органических жидкостей;

простота эксплуатации;

высокие маневренные характеристики;

сравнительно низкие значения температур и давлений рабочего тела, что обуславливает невысокий уровень шума и длительный срок службы оборудования.

Благодаря вышеперечисленным преимуществам, ОЦР-установки находят применение в различных системах утилизации тепла, таких как геотермальные электростанции, комплексы утилизации тепла выхлопных газов газотурбинных и газопоршневых установок, системы, работающие на тепле технологических газов (цементная промышленность, производство кирпича, и пр.), комплексы получения электроэнергии, работающие на биомассе (отходах деревообработки), и пр.

Применение теплосиловой ОЦР-установки с низкокипящим рабочим веществом (НРВ) позволяет получать дополнительную электрическую энергию, снижая энергоемкость производства и полезно утилизируя тепловые отходы технологических агрегатов, характеризующиеся непрерывностью поступления и большой количественной концентрированностью.

Авторами работ [4-6] справедливо отмечена перспективность применения ОЦР-

технологии на компрессорных станциях металлургических предприятий для снижения температуры сжимаемого газа при возможно меньших потерях на эксплуатацию системы охлаждения и использования отведенной теплоты с максимальной эффективностью. Однако выполненное авторами настоящей работы расчетное исследование позволило выявить некоторые технические особенности, которые необходимо учитывать при внедрении предлагаемой технологии на объекты.

Определение потенциала энергосбережения на компрессорной станции. Энергетическая эффективность и практическая значимость применения ОЦР-установки может быть определена для технологической схемы снабжения техническими газами процесса получения стального проката из железной руды ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», представленной в работе [4].

В состав технологической схемы входят четыре компрессорные установки (КУ), основные характеристики которых представлены в таблице 1.

Все КУ технологической схемы производят сжатие газов в последовательно соединенных ступенях. При этом охлаждение газа между ступенями осуществляется посредством теплообменников – промежуточных и конечных охладителей. Теплота отводится системой охлаждения – как правило, циркуляционной водой из прудов-охладителей, – и рассеивается в атмосфере. Принципиальная схема КУ технологической схемы станции представлена на рисунке 1.

Таблица 1 – Основные характеристики КУ

№	Модель	Сжимаемый газ	Давление на входе $p_{вх}$, МПа	Давление на выходе $p_{вых}$, МПа	Расход газа m , кг/с	Число ступеней z
1	К-1500	Воздух	0,101325	0,736	29,70	3
2	АЭРОКОМ АА-259/31А	Азот	0,1	3,040	5,384	5
3	КТК-12,5/35	Кислород	0,1	3,430	4,958	5
4	К-1500	Обогащенный кислородом воздух	0,101325	0,736	29,70	3

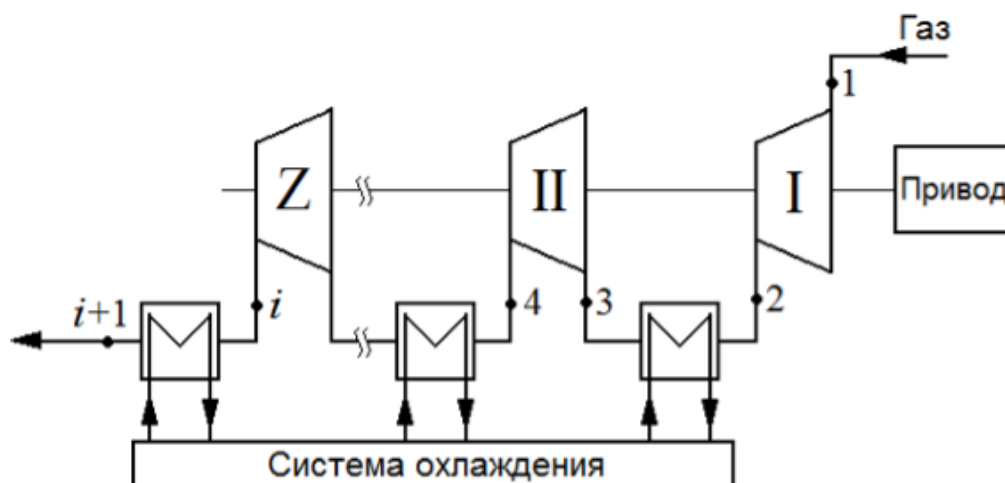


Рисунок 1 – Принципиальная схема КУ для сжатия газа

Для расчета тепловой мощности межступенчатого охлаждения КУ принималось, что процессы сжатия газов в ступенях – адиабатные, процессы охлаждения между ними – изобарные, газы при рабочих параметрах обладают свойствами идеальных [7], недоохлаждение газа до температуры воды системы охлаждения составляет 10 °С. Степень повышения давления в каждой ступени КУ при условии охлаждения после каждого процесса сжатия в ступени до одной и той же температуры может быть рассчитана по формуле:

$$\beta = \sqrt[z]{\frac{p_{вых}}{p_{вх}}}$$

где z – количество ступеней в КУ;
 $p_{вых}$ – давление газа на выходе из КУ;
 $p_{вх}$ – давление газа на входе в КУ.

Забор атмосферного воздуха в КУ №1 и №4 производится при температуре внешней (окружающей) среды. Сжатый КУ №1 воздух поступает в воздуходелительную установку, после которой азот и кислород поступают, соответственно, в КУ № 2 и № 3 с давлением 0,1 МПа и температурой 30 °С.

На вход КУ №4 поступает два потока газа: воздух из атмосферы (92,6% массового расхода смеси газов) и часть потока

кислорода после КУ №3 для обогащения дутья (7,4% массового расхода смеси газов). После КУ №4 обогащенный кислородом воздух вдувают в доменную печь. Температура смеси газов $t_{см}$, °С, поступающей на вход в КУ №4, может быть рассчитана по формуле:

$$t_{см} = \frac{m_{\tau_{O_2}} \cdot c_{p_{O_2}} \cdot t_{O_2} + m_{\tau_{B}} \cdot c_{p_{B}} \cdot t_{B}}{m_{\tau_{O_2}} \cdot c_{p_{O_2}} + m_{\tau_{B}} \cdot c_{p_{B}}},$$

где $m_{\tau_{O_2}}$ – расход кислорода через КУ №4, кг/с;

$c_{p_{O_2}}$ – удельная изобарная теплоемкость кислорода, определяемая по его температуре на выходе из КУ №3 [7], кДж/(кг·К); t_{O_2} – температуре кислорода на выходе из КУ №3, °С;

где $m_{\tau_{B}}$ – расход атмосферного воздуха через КУ №4, кг/с;

$c_{p_{B}}$ – удельная изобарная теплоемкость воздуха, определяемая по температуре окружающей среды [7], кДж/(кг·К);

t_{B} – среднемесячная температура атмосферного воздуха в г. Магнитогорск, °С (по данным сайта www.weather-atlas.com).

Ввиду того, что доля кислорода в смеси невелика, при расчете процессов сжатия и межступенчатого охлаждения можно определять теплофизические

свойства смеси газов в приближении, что рабочее тело – воздух (по температуре смеси).

Результаты расчета температур в характерных точках КУ (рис. 1) для всех месяцев года приведены в таблице 2 (температуры воды и воздуха приведены по данным сайтов <https://pogoda1.ru/magnitogorsk/> и www.weather-atlas.com).

Определив температуры газов перед межступенчатыми охладителями (МСО) и после, можно рассчитать тепловую мощность данных аппаратов, т.е. тепловые потери, передаваемые системе охлаждения каждым компрессором. Суммарная тепловая мощность МСО КУ может быть рассчитана следующим образом:

$$Q_{МСО} = m_{\tau_r} \cdot c_{p_r} \times [(t_2 - t_3) + (z - 1) \cdot (t_i - t_{i+1})], \quad (3)$$

где m_{τ_r} – расход газа через КУ, кг/с;

c_{p_r} – удельная изобарная теплоемкость газа при средней его температуре в ступенях КУ [7], кДж/(кг·К);

t_2, t_3, t_i, t_{i+1} – температуры газа в характерных точках КУ (рис. 1, табл. 2), °С;

z – количество ступеней в КУ (табл. 1).

Результаты расчета тепловой мощности МСО КУ технологической схемы представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Температуры газов в характерных точках КУ по месяцам года, °С

Месяц	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Ноя	Дек
$t_{\text{атм.возд}}$	-14,1	-13,5	-7,1	4,5	12,4	18,2	19,2	17,0	11,1	3,6	-5,9	-11,9
$t_{\text{воды}}$	5,4	4,0	4,0	9,8	12,9	14,0	21,8	22,1	17,5	15,9	10,6	4,7
Компрессор К-1500 (воздух)												
t_1	-14,1	-13,5	-7,1	4,5	12,36	18,2	19,2	17	11,1	3,6	-5,9	-11,9
t_2	39,8	40,5	48,2	62,2	71,6	78,7	79,9	77,3	70,2	61,1	49,7	42,5
$t_3 = t_{i+1}$	15,4	14,0	14,0	19,8	22,9	24,0	31,8	32,1	27,5	25,9	20,6	14,7
$t_4 = t_i$	75,4	73,7	73,7	80,6	83,0	85,7	95,0	95,4	89,9	87,9	81,6	74,4
АЭРОКОМ АА-259/31А (азот)												
t_1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
t_2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2
$t_3 = t_{i+1}$	15,4	14,0	14,0	19,8	22,9	24,0	31,8	32,1	27,5	25,9	20,6	14,7
$t_4 = t_i$	77,5	75,8	75,8	82,8	86,6	87,9	97,3	97,7	92,2	90,2	83,8	76,6
КТК-12,5/35 (кислород)												
t_1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
t_2	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7
$t_3 = t_{i+1}$	15,4	14,0	14,0	19,8	22,9	24,0	31,8	32,1	27,5	25,9	20,6	14,7
$t_4 = t_i$	79,1	77,4	77,4	84,4	88,1	89,5	98,8	99,2	93,7	91,8	85,4	78,3
Компрессор К-1500 (обогащенный кислородом воздух)												
t_1	-12,1	-11,6	-5,7	5,5	13,1	18,6	20,1	18,0	12,2	5,1	-4,1	-10,1
t_2	42,4	43,1	49,6	63,5	72,5	79,2	80,9	78,5	71,3	62,8	52,0	44,8
$t_3 = t_{i+1}$	15,4	14,0	14,0	19,8	22,9	24,0	31,8	32,1	27,5	25,9	20,6	14,7
$t_4 = t_i$	75,3	73,7	73,7	80,6	84,3	85,7	95,0	95,4	89,9	88,0	81,6	74,5

Таблица 3 – Тепловая мощность МСО КУ, кВт

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сент	Окт	Ноя	Дек
К-1500	4314	4359	4589	4900	5046	5321	5214	5133	5005	4757	4515	4398
АЭРОКОМАА-259/31А	1843	1844	1844	1839	1837	1835	1827	1828	1834	1834	1839	1842
КТК-12,5/35	1530	1534	1534	1526	1523	1523	1515	1516	1520	1522	1526	1531
К-1500	4358	4409	4602	4907	5118	5302	5210	5136	5005	4783	4554	4444
$\Sigma Q_{\text{МСОК}}$	12045	12146	12569	13172	13524	13981	13766	13613	13364	12896	12434	12215

Полученные результаты свидетельствуют о большом потенциале энергосбережения за счет полезной утилизации теплоты МСО КУ. В течение года тепловая нагрузка характеризуется непрерывностью поступления, варьируется по месяцам от 12 до 14 МВт, а диапазон рабочих температур (табл. 2) подтверждает применимость ОЦР-технологии.

Выбор рабочего вещества ОЦР для утилизационной энергоустановки. Итак, закономерным решением поставленной задачи является замена воды в промежуточных теплообменниках КУ на НРВ (фреон), традиционно используемый в охладителях при низких температурах. Существует широкий спектр органических жидкостей, которые могут быть использованы в качестве рабочего вещества

ОЦР-установки. Выбор конкретного рабочего вещества установки зависит от многих факторов, в частности, от источника энергии, диапазона рабочих температур, давлений и мощности установки, законодательных ограничений, стоимости, стабильности, степени влияния на окружающую среду, безопасности, доступности и пр.

Однако зачастую определяющими критериями выбора являются безопасность и термодинамическая эффективность цикла, которая существенно зависит от теплофизических свойств НРВ.

Для расчета и сравнительного анализа эффективности ОЦР в настоящей работе были выбраны три НРВ: октафторциклобутан C_4F_8 (RC318), пентан C_5H_{12} (R601) и пентафлуоропропан $C_3H_3F_5$ (R245fa).

В настоящее время вещества фторуглеродного класса (C_3F_8 , C_4F_8 , C_4F_{10}) предлагаются в качестве заменителей водяных и газовых рабочих тел в теплосиловых циклах атомной отрасли и малой энергетики [8, 9], а также в термотрансформаторах в составе неазеотропных смесей с гексафторидом серы [10].

Традиционным и зачастую рекомендуемым [11,12] к использованию в ОЦР ввиду высокой энергетической эффективности цикла и благоприятных теплофизических свойств, является пентан C_5H_{12} . Но следует отметить, что данное рабочее вещество является токсичным и легко воспламеняемым, что влечет за собой необходимость организации промежуточного термомасляного контура охлаждения источника.

Гидрофторуглерод $C_3H_3F_5$ также достаточно часто рекомендуется к использованию в системах рекуперации энергии при повышенных температурах (прежде всего, ОЦР-системах) [11-14]. Не токсичный, озонобезопасный фреон $C_3H_3F_5$ относят к слабогорючим веществам (класс

опасности А1) с температурой самовоспламенения порядка $410^\circ C$, что позволяет использовать его в данном термодинамическом цикле, сопоставимом по эффективности с бутаном, пентаном и его изомерами без использования традиционного для ОЦР-установок промежуточного контура с термомаслом, обеспечивающего пожаробезопасность установки.

Применение ОЦР-установки для утилизации теплоты МСО КУ.

Используемые в настоящее время ОЦР-установки, как правило, относительно просты, они работают в докритическом диапазоне температур и давлений НРВ. В большинстве случаев цикл организуется с регенерацией тепловой энергии.

Для утилизации теплоты МСО КУ традиционный водяной охладитель предлагается заменить на фреоновый парогенератор (ФПГ), в котором фреон будет нагреваться до состояния перегретого пара (рис. 2). Пар из всех ФПГ поступает в общий коллектор пара фреона, и, перемешиваясь, общим потоком направляется в турбогенератор, вырабатывающий электрическую мощность. После турбины пар фреона охлаждается в регенеративном теплообменнике и конденсируется. Затем фреон в жидком состоянии последовательно прокачивается насосом через регенеративный теплообменник в общий коллектор жидкого фреона, питающий ФПГ.

Следует отметить, что холодным источником (охлаждающим фреон в конденсаторе) для данной теплосиловой установки является циркуляционная вода из прудов-охладителей, которая применялась традиционно для МСО КУ. В случае, если применять для этой цели атмосферный воздух, предлагаемый авторами в работах [4-6], необходимо учитывать существенное увеличение необходимой площади теплообменной поверхности воздушных конденсаторов по сравнению с водяными, а в

расчете эффективности установки – затраты на привод вентиляторов для принудительного охлаждения фреона.

Так как фреоновый коллектор пара работает на всю группу КУ, то для укрупненной оценки потенциально возможной температуры фреона на входе в турбину

$$\bar{t}_{\text{вых}} = \frac{m_{\tau_1} \cdot c_{p_1} \cdot \bar{t}_{\text{вых1}} + m_{\tau_2} \cdot c_{p_2} \cdot \bar{t}_{\text{вых2}} + m_{\tau_3} \cdot c_{p_3} \cdot \bar{t}_{\text{вых3}} + m_{\tau_4} \cdot c_{p_4} \cdot \bar{t}_{\text{вых4}}}{m_{\tau_1} \cdot c_{p_1} + m_{\tau_2} \cdot c_{p_2} + m_{\tau_3} \cdot c_{p_3} + m_{\tau_4} \cdot c_{p_4}},$$

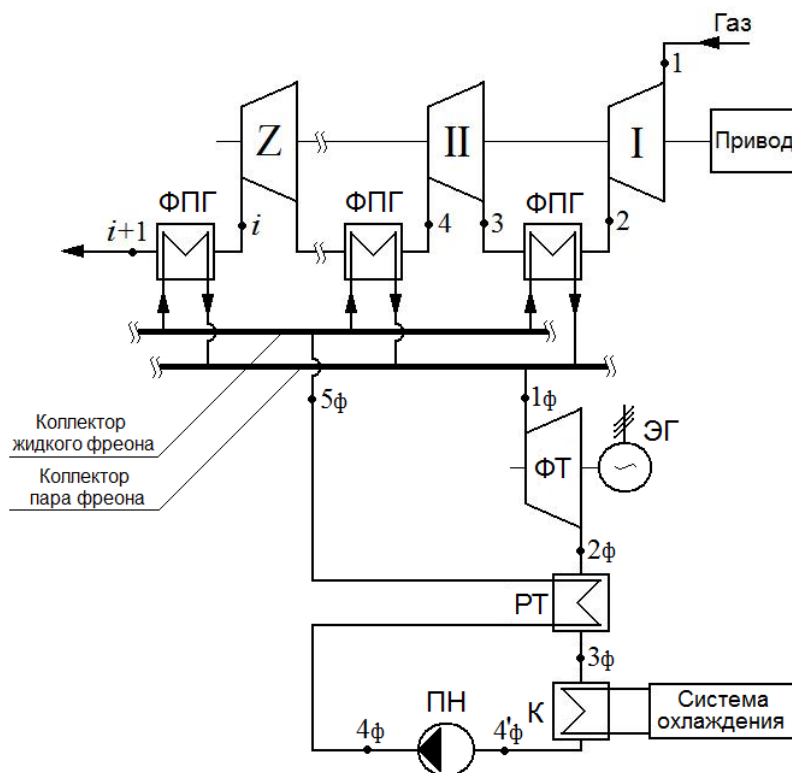
где m_{τ_j} – расход газа через j -ю КУ (табл. 1), кг/с;

c_{p_j} – удельная изобарная теплоемкость газа, определяемая по средней температуре газа в j -ой КУ, кДж/(кг·К);

необходимо рассчитать среднюю температуру газов на выходе из всех ступеней компрессоров $\bar{t}_{\text{вых}}$. Для простоты записи формулы использовались следующие обозначения: 1 – воздух, 2 – азот, 3 – кислород, 4 – обогащенный кислородом воздух.

$\bar{t}_{\text{вых}j} = \frac{\sum t_{\text{выих}i}}{z}$ – средняя температура газа на выходе из ступени j -ой КУ, °С;

$t_{\text{выих}i}$ – температуры газа в конце процесса сжатия в каждой ступени компрессорной установки (табл. 2), °С.



ФПГ – фреоновый парогенератор; ФТ – фреоновая турбина; ЭГ – электрогенератор; РТ – регенеративный теплообменник; К – конденсатор; ПН – питательный насос

Рисунок 2 – Принципиальная схема утилизации теплоты МСО газа в ОЦР-установке

Среднюю температуру пара фреона на входе в турбину $\bar{t}_{1\phi}$, °С, можно рассчитать, задав минимальную температурную разность $\Delta t_{\text{выихПГ}} = \bar{t}_{\text{вых}} - \bar{t}_{1\phi} = 15^\circ\text{C}$.

Как уже отмечалось выше, холодным источником, охлаждающим пар фреона в

конденсаторе, является та же водная система охлаждения, которая ранее обеспечивала отвод теплоты в МСО. Соответственно, температура фреона в конденсаторе должна быть выше температуры воды на заданную величину

температурного напора в теплообменнике $\Delta t_K = t_{4\phi} - t_{\text{воды}} = 5^\circ\text{C}$.

Так как температурный перепад (между горячим и холодным источником) в ОЦР-установке не слишком высокий, то предполагается, что установка будет

работать при докритическом давлении фреона, что, с учетом критических параметров рассматриваемых веществ (табл. 4) свидетельствует о пренебрежимо малой работе насоса фреонового контура, следовательно, $t_{4\phi} = t_{4\phi}$.

Таблица 4 – Характеристики рабочих веществ [20]

Рабочее вещество	R601	Rc318	R245fa
Химическая формула	C_5H_{12}	C_4F_8	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$
Молярная масса, кг/кмоль	72,15	200,03	134,05
Критическая температура, К	469,54	388,38	427,16
Критическое давление, МПа	3,331	2,78	3,65
Температура кипения t_s , К (при $p = 0,1013$ МПа)	237,08	267,17	288,28
Теплота испарения при t_s , кДж/кг	361,2	116,75	196,05
Озоноразрушающий потенциал (ODP)	0	0	0
Потенциал глобального потепления (GWP)	11	9100	950

Отдельной задачей исследования является определение оптимального давления фреона на входе в турбину ОЦР-установки, обеспечивающего ее максимальную эффективность.

Такое давление может быть определено по температуре насыщения в фреоном парогенераторе: чем она выше, тем выше эффективность цикла. При выборе данной температуры следует избегать получения отрицательного температурного напора в парогенераторе. Принимая во внимание данную проблему, можно считать, что экономайзерная часть подогрева фреона в цикле (процесс 4ф – 5ф) будет осуществляться посредством регенеративного теплообменника за счет охлаждения пара после фреоновой турбины (2ф – 3ф), а испарение и перегрев пара фреона – в фреоном парогенераторе (5ф – 1ф).

Таким образом, температура фреона на входе в парогенератор (она же температура насыщения в нем) может быть определена с учетом заданной

разницы температур $\Delta t_{\text{вхпг}} = t_{\text{вхi}} - t_{5\phi} = 5^\circ\text{C}$, где $t_{\text{вхi}} = t_3 = t_{i+1}$ – температура газа на входе в ступень после промежуточного охлаждения (табл. 2).

Предварительный расчет цикла (рис. 3) на рассматриваемых НРВ (табл. 4) показал, что в такой постановке задачи его термический КПД не превышает 1%, что не обеспечивает никакой практической значимости внедрения ОЦР-технологии на производство.

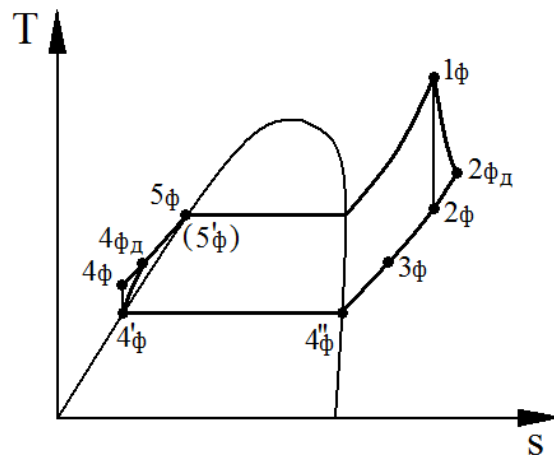


Рисунок 3 – Органический цикл Ренкина в T,s-диаграмме

Применение модифицированной схемы для утилизации теплоты МСО КУ. Получить практический и технико-экономический результат от

внедрения ОЦР-технологии позволяет переход на двухступенчатое охлаждение газа между ступенями компрессора (рис. 4).

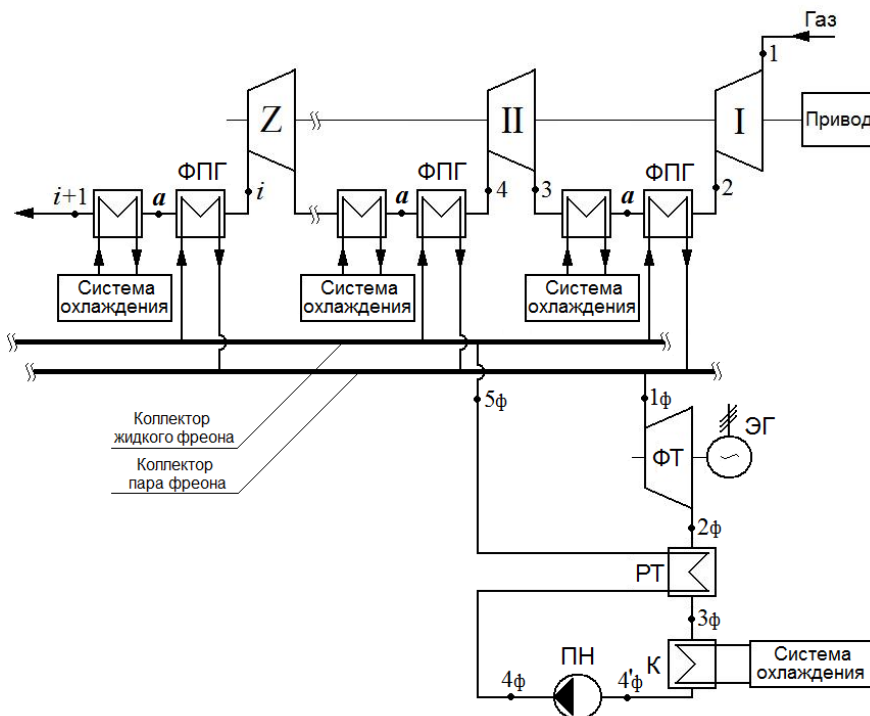


Рисунок 4 – Принципиальная схема двухэтапной утилизации теплоты МСО газа в ОЦР-установке

В предлагаемой схеме ФПГ – первый по ходу газа теплообменник, в котором за счет охлаждения газа от температуры на выходе из каждой ступени до температуры в точке «а», кипит и перегревается НРВ из коллектора жидкого фреона. Для оценочного расчета можно принять, что средняя температура газа в точке «а» определяется из заданной разности: $\Delta t_{\text{ФПГ}} = \bar{t}_{\text{ВЫХ}} - \bar{t}_a = 35^\circ\text{C}$. При этом средняя температура жидкого фреона в коллекторе (точка 5ф), может быть определена из условия минимального температурного напора в теплообменнике: $\Delta t_{\text{ВХФПГ}} = \bar{t}_a - \bar{t}_{5\text{ф}} = 5^\circ\text{C}$ ($\bar{t}_{\text{ВЫХ}} - \bar{t}_{5\text{ф}} = 40^\circ\text{C}$).

После охлаждения газа в первой ступени – ФПГ, он поступает в теплообменник

второй ступени, где охлаждается водой традиционной системы охлаждения.

Определив температуры и давления в характерных точках цикла и задаваясь значениями внутренних относительных КПД турбины ($\eta_{oi}^T = 0,85$) и насоса ($\eta_{oi}^H = 0,85$), можно рассчитать теплофизические свойства [15] рассматриваемых рабочих веществ и внутренний КПД цикла.

Давления фреонов в конденсаторе и парогенераторе могут быть определены, соответственно, по температурам $t_{4\text{ф}}$ и $t_{5\text{ф}}$.

Энтальпия фреона в точке 3ф при этом может быть определена из уравнения теплового баланса регенеративного теплообменника $h_{3\text{ф}} = h_{2\text{фд}} - h_{5\text{ф}} + h_{4\text{фд}}$.

В случае если отводимой от уходящих газов турбины теплоты $h_{2\phi_d} - h_{3\phi}$ не хватает для нагрева жидкой фазы фреона в регенеративном теплообменнике $h_{5\phi} - h_{4\phi_d}$, то принимается, что $h_{3\phi} = h_{4''\phi}$, и из уравнения теплового баланса теплообменника определяется $h_{5\phi} = h_{2\phi_d} - h_{4''\phi} + h_{4\phi_d}$. При этом температура насыщения фреона в парогенераторе по-прежнему рассчитывается как $t_{5'\phi} = \bar{t}_{\text{вых}} - 40^\circ\text{C}$.

Внутренний КПД цикла ОЦР-установки может быть рассчитан по формуле

$$\eta_i = \frac{(h_{1\phi} - h_{2\phi_d}) - (h_{4\phi_d} - h_{4'\phi})}{h_{1\phi} - h_{5\phi}},$$

где $h_{2\phi_d} = h_{1\phi} - (h_{1\phi} - h_{2\phi}) \cdot \eta_{0i}^T$,
 $h_{4\phi_d} = \frac{h_{4\phi} - h_{4'\phi}}{\eta_{0i}^H} + h_{4'\phi}$

Анализ полученных результатов

Результаты расчета внутренних КПД цикла для всех рассматриваемых рабочих веществ и всех среднемесячных нагрузок представлены на рис. 5.

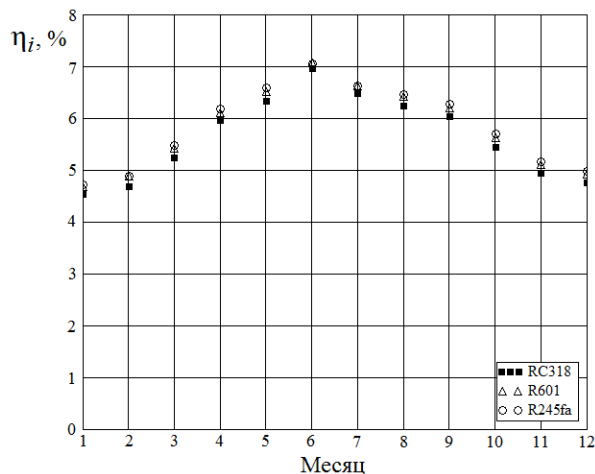


Рисунок 5 – Внутренний КПД цикла ОЦР-установки на НРВ

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что по значениям внутренних КПД цикла сопоставимы НРВ R245fa и R601 для всех рассматриваемых среднемесячных нагрузок. Но, так как вещество R601 токсично и взрывоопасно, требует вспомогательного термомасляного контура для обеспечения безопасности, оно не может быть рекомендовано к использованию.

Полученные параметры цикла на рассматриваемых НРВ позволяют также проанализировать давления фреонов в аппаратах установки (табл. 5).

Результаты свидетельствуют о том, что наименее подходящим веществом для эксплуатации в ОЦР-установке на заданные параметры является R601. И в конденсаторе, и в парогенераторе для большинства месяцев давление фреона существенно ниже атмосферного, что влечет за собой повышенные требования к герметичности аппаратов из-за возможных присосов атмосферного воздуха.

При работе цикла на веществе RC318 на протяжении всего года достигается оптимальное давление как в парогенераторе, так и в конденсаторе. Однако циклы на данном рабочем веществе проигрывают в термодинамической эффективности рассматриваемым аналогам во всех месяцах года.

Таким образом, оптимальным сочетанием параметров, удовлетворяющих требованиям к безопасности и эффективности установки, является рабочее вещество R245fa. Максимальный внутренний КПД цикла на R245fa составляет 7,05% (в июне) при давлении 0,298 МПа и температурах 69,4 °С на входе в турбину и 19,0 °С в конденсаторе.

Таблица 5 – Давления НРВ в аппаратах установки, МПа

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Парогенератор												
p_{RC318}	0,328	0,318	0,340	0,442	0,508	0,557	0,669	0,662	0,565	0,508	0,408	0,329
p_{R601}	0,072	0,070	0,075	0,102	0,120	0,134	0,165	0,163	0,136	0,120	0,093	0,073
p_{R245fa}	0,157	0,152	0,163	0,222	0,260	0,298	0,357	0,352	0,294	0,260	0,202	0,158
Конденсатор												
p_{RC318}	0,191	0,181	0,181	0,223	0,247	0,257	0,331	0,334	0,288	0,274	0,229	0,186
p_{R601}	0,038	0,036	0,036	0,046	0,052	0,054	0,073	0,074	0,062	0,059	0,048	0,037
p_{R245fa}	0,083	0,079	0,079	0,100	0,113	0,118	0,158	0,160	0,135	0,127	0,103	0,081

Оценить практический и технико-экономический эффект от применения модифицированной схемы для утилизации теплоты МСО КУ можно, рассчитав дополнительную мощность на собственные нужды предприятия, вырабатываемую ОЦР-установкой.

Расход фреона в ОЦР-установке для каждого месяца может быть определен из уравнения теплового баланса МСО газа и ФПГ:

$$\sum_{j=1}^4 m_{\tau_j} \cdot c_{p_j} \cdot [(t_2 - \bar{t}_a) + (z - 1) \cdot (t_i - \bar{t}_a)] = m_{\tau_{\phi}} (h_{1\phi} - h_{5\phi}).$$

Таблица 6 – Расход рабочего вещества R245fa и мощность ОЦР-установки

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
m_{τ} , кг/с	39,1	39,0	39,0	39,4	39,4	39,1	40,3	40,5	40,1	40,0	39,6	39,0
$N_{\text{ОЦР}}$, кВт	394	407	455	509	535	575	542	529	515	469	429	415
$Q_{\text{утил}}$, кВт	8345	8330	8294	8233	8195	8148	8163	8179	8211	8225	8304	8328

Помимо расхода и электрической мощности, в таблице 6 также представлены данные о полезно утилизируемой тепловой нагрузке МСО. Следует отметить, что данная величина определена без учета теплоты, передаваемой в конденсаторе ОЦР-установки от фреона к циркуляционной воде, однако данный вклад не будет существенно влиять на результат ввиду небольшого отклонения температуры фреона от температуры воды.

Определив расход фреона, можно оценить величину действительной мощности ОЦР-установки:

$$N_{\text{ОЦР}} = m_{\tau_{\phi}} \cdot (l_{\text{д}}^T - l_{\text{д}}^H),$$

где $l_{\text{д}}^T = h_{1\phi} - h_{2\phi_{\text{д}}}$ – действительная работа фреоновой турбины, кДж/кг;

$l_{\text{д}}^H = h_{4\phi_{\text{д}}} - h_{4'\phi}$ – действительная работа насоса, кДж/кг.

Результаты расчета для НРВ R245fa представлены в таблице 6.

По результатам расчетной оценки, процентное отношение $Q_{\text{утил}}$ к теплоте, традиционно рассеиваемой в окружающей среде посредством охлаждения прудовоохладителей $Q_{\text{МСО}}$ (табл. 1), по году варьируется от 58 до 69%, что позволяет сделать вывод о возможности существенного снижения теплового загрязнения атмосферы за счет внедрения предлагаемой схемы.

Выводы

Проведенное расчетное исследование по анализу возможностей полезной утилизации теплоты МСО КУ с целью получения дополнительной электрической мощности для металлургического производства в ОЦР-установке позволило выявить особенности внедрения технологии и получить следующие результаты.

Расчетные значения ежемесячных тепловых потерь в МСО КУ, охлаждаемых водой (при использовании традиционной схемы), свидетельствуют о большом потенциале энергосбережения в этой области. Теряемая безвозвратно в прудах-охладителях тепловая нагрузка варьируется в течение года от 12 до 14 МВт. Непрерывность нагрузки, ее количественная концентрированность и температурный диапазон подтверждают возможность применения ОЦР-технологии.

Утилизация теплоты МСО и генерация электрической энергии ОЦР-установкой возможна при объединении КУ, сжимающих различные газы, единым фреоновым контуром с двумя общими коллекторами (подводимого жидкого фреона и отводимого пара фреона). При размещении КУ на существенном отдалении друг от друга возможно дробление ОЦР-системы на установки меньшей мощности.

В ОЦР-установке невозможна организация полного охлаждения газа после ступени компрессора до температуры, полученной при использовании традиционной водяной системы охлаждения. Это обусловлено двумя причинами: необходимостью наличия холодного источника теплоты для реализации ОЦР на НРВ, а также низкой эффективностью ОЦР при глубоком охлаждении газа.

Предложена схема отвода и утилизации теплоты газа между ступенями КУ, состоящая из двух последовательно включенных теплообменников, первый из

которых по ходу газов является ФПГ, в котором кипит и перегревается фреон, а второй охлаждается водой традиционной системы охлаждения. При использовании такой схемы полезно утилизируется не менее 58% теплоты, традиционно безвозвратно теряемой в системе водяного охлаждения. Возможно, необходимо проведение дополнительного расчетного исследования (методами эксергетического анализа или максимальной эффективности теплообменника) по поиску оптимальной температуры газа между теплообменниками МСО (в данном исследовании было принято, что первая ступень (ФПГ) охлаждает газ в среднем на 35 °С).

Для предложенной схемы определены температуры, давления и теплофизические свойства рассматриваемых рабочих веществ R318, R601, R245fa в характерных точках цикла на НРВ, а также внутренние КПД для различных месяцев работы установки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости всех рассматриваемых НРВ для данной схемы, однако максимальная эффективность и безопасность установки отмечена при использовании фреона R245fa. Максимальная мощность ОЦР-установки на R245fa достигается в июне, и составляет 575 кВт при расходе рабочего вещества 39,1 кг/с.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И. Тепловые отходы и их влияние на энергоэффективность российской экономики: территориальный и отраслевой аспекты // Экономический анализ: теория и практика. 2016. №6. С. 42-54.
- [2]. Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В., Матвеев С.В. Применение теплоты жидкой стали для снижения

- потребления электроэнергии при плавке в дуговой сталеплавильной печи // Энергетика теплотехнологий. 2018. №1. С. 4-8.
- [3]. Потрубач Н.Н. Вторичные ресурсы как фактор повышения энергетической безопасности регионов России // Микроэкономика. 2018. №1. С. 21-27.
- [4]. Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В. Совершенствование схемы промежуточного охлаждения сжимаемого газа в системе снабжения техническими газами металлургического производства // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1 (34). С.37-43.
- [5]. Слепова И.О., Нешпоренко Е.Г. Выработка электрической энергии на базе производства сжатого кислорода для электросталеплавильного производства // Новое слово в науке: перспективы развития. 2015. №4 (6). С. 174-176.
- [6]. Экономные компрессоры / Демин Ю.К., Слепова И.О., Хасанова Р.В., Картавец С.В. // Энергонадзор. 2015. №4. С. 14-16.
- [7]. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
- [8]. Сухих А.А., Милютин В.А., Антаненкова И.С. Термодинамическая эффективность фторуглеродов как рабочих тел в теплосиловых циклах АЭС // Электрические станции. 2010. №10. С. 2-8.
- [9]. Моркин М.С., Лемехов В.В., Черепнин Ю.С., Мазурин И.М., Сухих А.А. Обзор результатов и методов комплексного исследования рабочих веществ фторорганического состава энергетических установок // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. №2. С. 135 – 142.
- [10]. Антаненкова И.С., Сухих А.А., Сычев В.В. Экспериментальное исследование энергетической эффективности теплонасосных установок на новых рабочих веществах // Холодильная техника. 2014. №10. С. 44-49.
- [11]. Гафуров А.М. Зарубежный опыт эксплуатации установок на низкокипящих рабочих телах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2014. №4 (24). С. 26-31.
- [12]. Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Особенности проектирования установок органического цикла Ренкина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. №6. С. 733-745.
- [13]. Антаненкова И.С., Королева А.П., Французов М.С., Сухих А.А., Сычев В.В. Проектирование основного теплообменного оборудования ORC-системы для двигателей внутреннего сгорания судовых установок // Теплоэнергетика. 2020. №12. С. 1-13.
- [14]. Огуречников Л.А. Выработка электроэнергии на фреоне R245fa // Холодильная техника. 2019. №1. С.26-29.
- [15]. База данных о теплофизических и переносных свойствах веществ NIST REFPROP DATABASE Version 8.0.

Антаненкова Ирина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной теплофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14)

Светогор Станислав Игоревич — и.о. начальника отдела эксплуатации тепловых энергоустановок и сетей Общества с ограниченной ответственностью «ВР-Ресурс» (Российская Федерация, 141103, Московская область, г. Щелково, ул. Ленина, д. 11).

Features of application of ORC-technology at compressor stations of metallurgical enterprises

I.S. Antanenkova^{1,*}, S.I. Svetogor^{2,*}

¹ *National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

² *Limited Liability Company «BP-Resource», Shchelkovo, Russia*

Abstract

The use of secondary energy resources in metallurgy with their conversion into mechanical and / or electrical energy allows not only to reduce the negative impact on the environment, but also to significantly increase the energy efficiency of facilities.

As a result the study design, the results of which are presented in this article defined the energy-saving potential at the compressor station metallurgical enterprises (on the example of the system of supply of technical gases of the process of production of rolled steel from iron ore PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works). A schematic solution and a method for determining the operating parameters of an installation operating according to the so-called "organic Rankine cycle" (ORC installation), which allows obtaining additional electrical energy for production needs by utilizing the heat of interstage cooling of compressor units, are proposed and justified. The features of the implementation of this technology are identified, and the working substance of the ORC installation that meets the requirements of safety and energy efficiency as much as possible is proposed for implementation. The values of the internal efficiency, the power of the ORC installation and the share of usefully utilized heat in the implementation of the proposed scheme are estimated.

Keywords

Organic Rankine cycle, energy saving, metallurgy, centrifugal compressor, interstage cooling, low-boiling working substance, R245fa

* *Corresponding author*

Email addresses: antanenkovais@mail.ru, s.svetogor@vrrs.ru

REFERENCES

- [1]. Sokolov A.D., Muzychuk S.Ju., Muzychuk R.I. Teplovye othody i ih vlijanie na jenergojeffektivnost' rossijskoj jekonomiki: territorial'nyj i otraslevoj aspekty [Thermal waste and its impact on the energy efficiency of the Russian economy: territorial and sectoral aspects]. *Jekonomicheskij analiz: teorija i praktika* [Economic analysis: theory and practice], 2016, No. 6, pp. 42-54. (In Russ.)
- [2]. Neshporenko E.G., Kartavcev S.V., Matveev S.V. Primenenie teploty zhidkoj stali dlja snizhenija potreblenija jelektrojenergii pri plavke v dugovoj staleplavil'noj pechi [Application of the heat of liquid steel to reduce the electricity consumption during melting in an arc steel furnace]. *Jenergetika teplotehnologij* [Energy of heat technologies], 2018, No. 1, pp.4-8. (In Russ.)
- [3]. Potrubach N.N. Vtorichnye resursy kak faktor povyshenija jenergeticheskoj bezopasnosti regionov Rossii [Secondary resources as a factor of increasing the Energy security of Russian Regions]. *Mikrojekonomika* [Microeconomics], 2018, No. 1, pp. 21-27. (In Russ.)
- [4]. Djomin Ju.K., Hasanova R.V., Neshporenko E.G., Kartavcev S.V. Sovershenstvovanie shemy promezhutochnogo ohlazhdenija szhimaemogo gaza v sisteme snabzhenija tehnikami gazami metallurgicheskogo proizvodstva [Improvement of the scheme of intermediate cooling of compressible gas in the supply system of technical gases of metallurgical production]. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2017, No. 1 (34), pp.37-43. (In Russ.)
- [5]. Slepova I.O., Neshporenko E.G. Vyrabotka jelektricheskoi jenergii na baze proizvodstva szhatogo kisloroda dlja jelektrostaleplavil'nogo proizvodstva [Electric power generation based on the production of compressed oxygen for electric steelmaking]. *Novoe slovo v nauke: perspektivy razvitiya* [A new word in science: prospects of development], 2015, No. 4 (6), pp. 174-176. (In Russ.)
- [6]. Demin Ju.K., Slepova I.O., Hasanova R.V., Kartavcev S.V. Jekonomnyje kompressory [Economical compressors]. *Jenergonadzor* [Energonadzor], 2015, No. 4, pp. 14-16. (In Russ.)
- [7]. Rivkin S.L. Termodinamicheskie svojstva gazov [Thermodynamic properties of gases.]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1987. 288 p. (In Russ.)
- [8]. Suhii A.A., Miljutin V.A., Antanenkova I.S. Termodinamicheskaja jeffektivnost' fluoruglerodov kak rabochih tel v teplosilovyh ciklah AJeS [Thermodynamic efficiency of fluorocarbons as working bodies in thermal power cycles of nuclear power plants]. *Jelektricheskie stancii* [Electric power stations], 2010, No. 10, pp. 2-8. (In Russ.)
- [9]. Morkin M.S., Lemehov V.V., Cherepnin Ju.S., Mazurin I.M., Suhii A.A. Obzor rezul'tatov i metodov kompleksnogo issledovanija rabochih veshhestv fluororganicheskogo sostava jenergeticheskikh ustanovok [Review of the results and methods of a comprehensive study of the working substances of the fluoro-organic composition of power plants]. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki* [Reliability and safety of power engineering], 2017, Vol. 10, No. 2, pp. 135 – 142. (In Russ.)
- [10]. Antanenkova I.S., Suhii A.A., Sychev V.V. Jeksperimental'noe issledovanie jenergeticheskoj jeffektivnosti teplonasosnyh ustanovok na novyh rabochih veshhestvah [Experimental study of the energy efficiency

of heat pump installations using new working substances]. *Holodil'naja tehnika* [Refrigeration equipment], 2014, No. 10, pp. 44-49. (In Russ.)

[11]. Gafurov A.M. Zarubezhnyj opyt zhekspluatatsii ustanovok na nizkokipjashhih rabochih telah [Foreign experience of operating installations on low-boiling working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University], 2014, No. 4 (24), pp. 26-31. (In Russ.)

[12]. Karabarin D.I., Mihajlenko S.A. Osobennosti proektirovaniya ustanovok organicheskogo cikla Renkina [Design features of Organic Rankine cycle Plants]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii* [Journal of the

Siberian Federal University. Series: Engineering and technology], 2019, Vol. 12, No. 6, pp. 733-745. (In Russ.)

[13]. Antanenkova I.S., Koroleva A.P., Francuzov M.S., Sukhikh A.A., Sychev V.V. Designing the Main Heat-Transfer Equipment of an ORC-System for the Internal Combustion Engines of Shipboard Installations. *Thermal Engineering*, 2021, Vol. 68, No. 1, pp. 25–36.

[14]. Ogurechnikov L.A. Vyrabotka jelektrojenergii na freone R245fa [R245fa Freon power generation]. *Holodil'naja tehnika* [Refrigeration equipment], 2019, No. 1, pp. 26-29. (In Russ.)

[15]. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Version 8.0.

Antanenkova I. S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Engineering Thermophysics, National Research University “MPEI” (Krasnokazarmennaya st., 14, Moscow, 111250, Russian Federation)

Svetogor S. I. — Acting Head of the Department of Operation of Thermal Power Plants and Networks of the Limited Liability Company "VR-Resource" (Lenin Street, 11, Moscow Region, Shchelkovo, 141103 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Особенности применения ОЦР-технологии на компрессорных станциях металлургических предприятий / И. С. Антаненкова, С. И. Светогор // Промышленные процессы и технологии. 2021. № 1. С. 61 – 76.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76

Please cite this article as:

Antanenkova I. S., Svetogor S.I. Features of application of ORC-technology at compressor stations of metallurgical enterprises. *Industrial processes ang Technologies*, 2021, no. 1, pp. 61 – 76.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76