

А. В. Букин, А. Ю. Кузьмин

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ СУДОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН НА ХЛАДАГЕНТЕ R22 И СМЕСЯХ R407C И R410A

Одной из серьезных задач, стоящих перед производителями и эксплуатирующими организациями судовой холодильной техники, является поэтапный переход на озонобезопасные холодильные агенты и отказ от использования хладагента R22. Необходимо, чтобы при ретрофите судовладельцы несли минимальные потери. Соблюдая требования Монреальского протокола, Российский морской регистр судоходства с 1995 г. запретил использование озоноразрушающих хладагентов R12 и R502 в новых установках. В качестве хладагентов, альтернативных R22, были предложены смесевые холодильные агенты R407C и R410A.

Для выбора подходящего хладагента при замене R22 в действующем холодильном оборудовании необходима методика анализа и сравнения работы холодильной машины на различных хладагентах. Существуют два основных метода – энергетический, с помощью холодильного коэффициента, и эксергетический, использующий понятие теплового потенциала относительно окружающей среды. Эксергетический анализ позволяет судить о термодинамическом совершенстве процессов, происходящих внутри каждого элемента холодильной машины.

При эксергетическом анализе производится расчет холодильной машины, в результате которого определяются сначала теплофизические и термодинамические свойства состояния хладагента на входе и выходе из элементов установки, а затем рассчитывается и эксергия в этих точках.

Была разработана математическая модель работы холодильной машины и проведен расчет судовой фреоновой одноступенчатой холодильной машины холодопроизводительностью 5 кВт для фреонов R22, R410A, R407C.

Параметры, для которых проводился расчет, были характерными для работы судовых холодильных машин: температура кипения $-30, -15, 0$ °С; температура конденсации $30, 40, 50$ °С; температура перегрева пара на всасывании в компрессоре -10 °С; температура переохлаждения жидкости после конденсатора -5 °С; температура окружающей среды -20 °С.

Схема эксергетического баланса холодильной машины представлена на рис. 1.

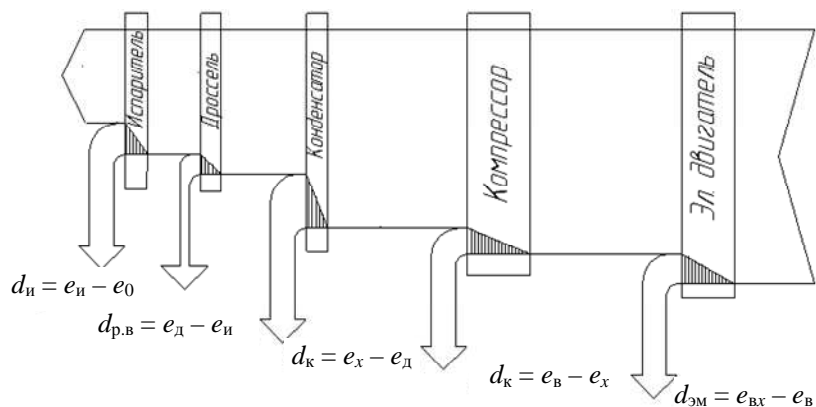


Рис. 1. Эксергетический баланс установки: $d_{эм}$, $d_{км}$, $d_к$, $d_{р.в}$, $d_и$ – потери эксергии соответственно в электродвигателе, компрессоре, конденсаторе, регулирующем вентиле и испарителе

По результатам расчета проводилось сравнение холодильных машин, работающих на однокомпонентом R22 и смесевых хладагентах R410A и R407C. Сравнивались полный КПД и потери эксергии в элементах холодильной установки. Результаты расчета были представлены в виде графиков зависимости потерь эксергии в элементах холодильной установки от температуры конденсации и температуры кипения. На основе анализа данных диаграмм были выявлены преимущества и недостатки применения того или иного хладагента в различных диапазонах температуры кипения и конденсации. Затем был проведен расчет холодильной машины при неизменной температуре кипения и различных значениях температуры конденсации для хладагентов R22, R410A, R407C (табл. 1).

Результаты расчета изменения потерь эксергии в зависимости от температуры конденсации

Хладагент, $t_0 = -15\text{ }^\circ\text{C}$	$t_k, \text{ }^\circ\text{C}$	КПД _{уст}	$d_{км}$	d_k	d_n	$d_{р.в}$
R410	30	0,46	4,37	8,960	3,89	6,16
	40	0,334	5,38	16,030	2,64	9,97
	50	0,253	6,20	22,500	1,47	14,36
R407	30	0,464	4,32	6,545	5,85	5,57
	40	0,31	5,52	15,830	5,01	10,85
	50	0,238	6,26	21,190	3,87	15,54
R22	30	0,483	3,99	7,770	3,32	4,69
	40	0,365	4,89	15,350	3,20	6,74
	50	0,288	5,66	21,200	3,05	9,67

Были построены сравнительные графики зависимости потерь эксергии в элементах от температуры конденсации, из которых видно, какой хладагент предпочтительнее в данной установке (рис. 2).

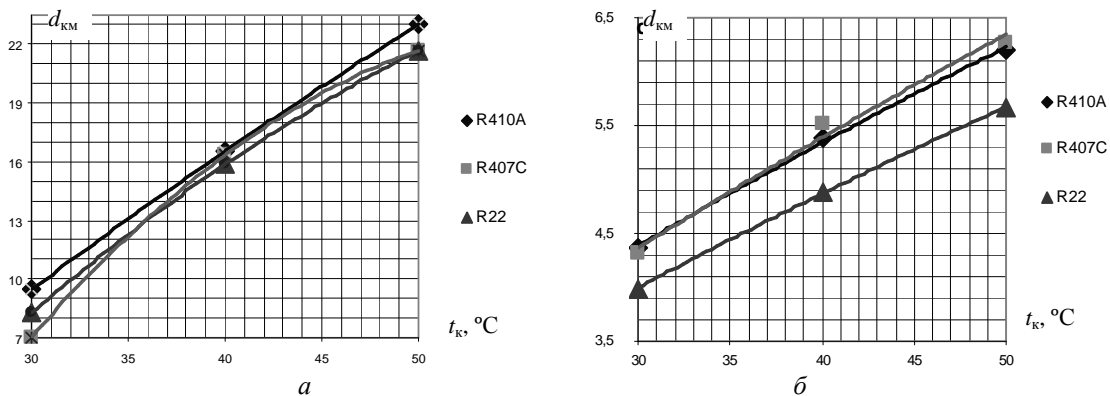


Рис. 2. Зависимость потерь эксергии: а – в конденсаторе; б – в компрессоре/электродвигателе от температуры конденсации при $t_0 = -15\text{ }^\circ\text{C}$

Из рисунка видно, что с ростом температуры конденсации происходит рост потерь эксергии в конденсаторе для всех исследуемых хладагентов. Следует отметить, что R410A имеет наибольшие потери в конденсаторе во всем диапазоне изменения температуры конденсации, а потери при работе на R407C имеют наименьшие значения при температуре конденсации ниже 35 °C. Видно также, что при увеличении температуры конденсации растут и суммарные потери эксергии в компрессоре и электродвигателе. Потери при работе на хладагентах R410A и R407C на 9–14 % больше, чем при работе на R22.

В табл. 2 приведены результаты расчета холодильной машины, работающей на хладагентах R22, R410A и R407C. При постоянной температуре конденсации $t_k = 30\text{ }^\circ\text{C}$ найдены значения потерь эксергии в узлах холодильной машины в зависимости от температуры кипения.

Таблица 2

Результаты расчета изменения потерь эксергии в зависимости от температуры кипения

Хладагент, $t_k = 30\text{ }^\circ\text{C}$	$t_0, \text{ }^\circ\text{C}$	КПД _{уст}	$d_{км}$	d_k	d_n	$d_{р.в}$
R410	0	0,3581	2,76	8,277	3,47	2,64
	-15	0,46	4,37	8,960	3,89	6,16
	-30	0,4714	6,47	9,700	4,38	11,73
R407	0	0,370	2,69	5,809	5,19	2,64
	-15	0,464	4,32	6,545	5,85	5,57
	-30	0,487	6,21	7,765	6,25	10,55
R22	0	0,390	2,42	7,167	2,89	2,05
	-15	0,483	3,99	7,769	3,32	4,69
	-30	0,503	5,88	10,163	3,97	8,21

На рис. 3 показаны зависимости потерь эксергии в испарителе и регулирующем вентиле от температуры кипения. Для всех сравниваемых хладагентов прослеживается рост потерь эксергии с уменьшением температуры кипения как в испарителе, так и в регулирующем вентиле. Характерно также, что интенсивность роста потерь примерно одинакова, однако эти потери при работе на R22 наименьшие, а при работе на R407C – наибольшие. В регулирующем вентиле холодильной машины потери при работе на R22 также наименьшие, а при работе на R407C и R410A больше на 5–20 % и 5–30 % соответственно.

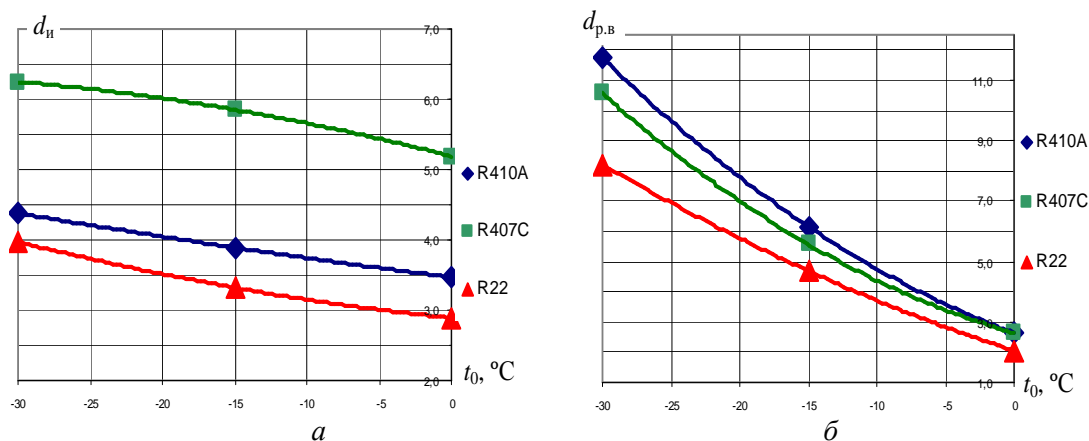


Рис. 3. Зависимость потерь эксергии: *a* – в испарителе; *б* – в регулирующем вентиле от температуры кипения при $t_k = 30\text{ }^\circ\text{C}$

Для сравнения эксергетических характеристик холодильных машин рассмотрим графики на рис. 4, где $K_{отн}$ – коэффициент отношения эксергетического КПД холодильной машины, работающей на R410A или R407C, к КПД холодильной машины, работающей на R22. Из графика на рис. 4, *a* видно, что показатели КПД холодильной машины, работающей на R407C и R410A ниже, чем работающей на R22, т. к. все значения коэффициента отношения $K_{отн}$ меньше 1. Отметим, что с ростом температуры конденсации значения КПД холодильной машины, работающей на альтернативных хладагентах, все более уменьшаются: значения его КПД холодильной машины, работающей на R407C ниже, чем у R22 на 4–17 %, у R410A – на 5–12 %.

На рис. 4, *б* показана зависимость $K_{отн}$ от температуры кипения: показатели КПД холодильной машины, работающей на R410A и R407C, также ниже, чем работающей на R22. Отметим, что с ростом температуры кипения значения КПД холодильной машины, работающей на R410A и R407C, уменьшаются относительно R22. Следовательно, применение альтернативных хладагентов при более низких значениях температуры выгоднее, т. к. значения КПД холодильной машины приближаются к значениям при работе на R22 и уступают им не более чем на 3–6 %. Однако при более высокой температуре кипения значения КПД при работе на R410A уступают таковым при работе на R22 уже более чем на 8 %. Представляет интерес также то, что $K_{отн}$ для R410A имеет максимальное значение при температуре кипения $-15\text{ }^\circ\text{C}$.

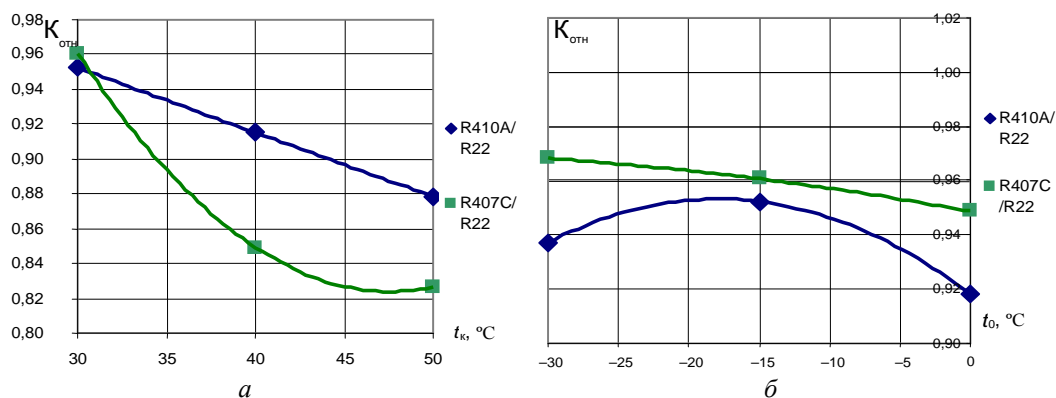


Рис. 4. Зависимость $K_{отн}$: *a* – от температуры конденсации; *б* – температуры кипения

Из результатов эксергетического анализа следует, что применение хладагентов R407C и R410A приводит к росту потерь эксергии во всех узлах холодильной машины. Эти потери уступают R22 в меньшей степени при работе холодильной машины с как можно меньшей температурой конденсации. При $t_k = 35$ °C и ниже потери эксергии в конденсаторе при работе на R407C имеют меньшие значения, чем при работе на R22. Следует также отметить, что растут потери и при уменьшении температуры кипения. При работе на R410A эти потери на 30–40 % больше, чем при работе на R22, а при работе на R407C потери больше в 2–2,5 раза. Потери растут также и в регулирующем вентиле при уменьшении температуры кипения, однако темпы роста при работе на R410A и R407C несколько большие, чем у R22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродянский И. П. Эксергетический метод анализ. – М.: Агропромиздат, 1986. – 294 с.

Статья поступила в редакцию 25.03.2009

THE EXERGY ANALYSIS OF THE MARINE REFRIGERATING MACHINE WORK ON THE REFRIGERANT R22 AND MIXTURES R407C AND R410A

A. V. Bukin, A. Yu. Kuzmin

The comparison of the marine refrigerating machine work and their elements on the ozone-saving mixed refrigerants R410A, R407C and ozone-depleting R22 is made on the basis of the exergic analysis. The parameters of the marine refrigerating machine work such as specific refrigerating capacity, exergy, exergy losses in the refrigerating machine units, exergic coefficient of efficiency are calculated. The graphics of these parameters dependence on the boiling-point and condensation are made. It is stated that the use of the refrigerants R407C and R410A as an alternative of R22 leads to the increase of the exergy losses in all refrigerating machine units.

Key words: refrigeration, specific refrigerating capacity, exergy, exergy losses in the refrigerating machines units, exergy coefficient of efficiency are calculated.