

ПОДБОР СМЕСЕВЫХ ХЛАДАГЕНТОВ ДЛЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

В.А. Воронов

П.Ю. Журлова

Д.Ю. Заболотный

С.С. Шереметьев

zabdenis1996@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описаны отдельные группы хладагентов, методика их сравнения с хладагентами R12 и R22. Представлена программа сравнения хладагентов, в том числе смесевых, с целью подбора наиболее эффективных. Описаны рабочий цикл, алгоритм и актуальность программы. Приведены результаты работы программы. Представлены наилучшие варианты смесей хладагентов, в соответствии с описанными критериями. На основании результатов даны рекомендации для дальнейшего использования выбранных смесей

Ключевые слова

Хладагент, смесь хладагентов, хладон, потенциал разрушения озонового слоя ODP, потенциал глобального потепления GWP

Поступила в редакцию 10.08.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

В последние годы обострилась проблема запрета широко применявшихся чистых хладагентов (R115, R12, R124, R142b, R22, трансбутен) вследствие высоких у них значений экологических потенциалов ODP и GWP [1, 2].

Одним из решений проблемы представляется использование смесей незапрещенных хладагентов, которые по своим характеристикам были бы близки к запрещаемым чистым хладагентам. Для подтверждения свойств смесей, работающих в одноступенчатом парокомпрессионном холодильном цикле, был создан экспериментальный стенд [3]. Однако крайне сложно проверить экспериментально все возможные комбинации компонентов и их долей в смеси. Более целесообразно выбрать несколько наиболее подходящих вариантов [4–10]. Для решения этой задачи была разработана программа, написанная на языке Delphi, которая позволяет определить наилучший состав смеси, основываясь на нескольких параметрах.

Программа рассчитывает цикл для одних и тех же условий, меняя состав и компоненты смеси. Сначала была построена оценочная расчетная модель, в которой использовался ряд следующих допущений. Цикл принимался идеальным, т. е. считали, что сжатие в компрессоре происходит по изоэнтропе, теплоприток на низком температурном уровне отсутствует, а также не учитывали

гидропотери в теплообменниках и трубопроводах, близость к критической точке и величину глайда в конденсаторе и испарителе.

Цикл, рассчитываемый программой, представлен на рисунке. Точкой 1 обозначен вход в компрессор, 2 — выход из компрессора, 3 — окончание процесса конденсации, начало дросселирования, 4 — выход из дросселя. Завершение процесса конденсации принято на пограничной кривой. Отметим также, что холодопроизводительность рассчитывают как разность энтальпий точек 1 и 4. Приняты следующие параметры цикла: температура кипения — 0 °С, конденсации — 40 °С, перегрев — 3 К. Такие параметры характерны для тепловых насосов вода–вода.

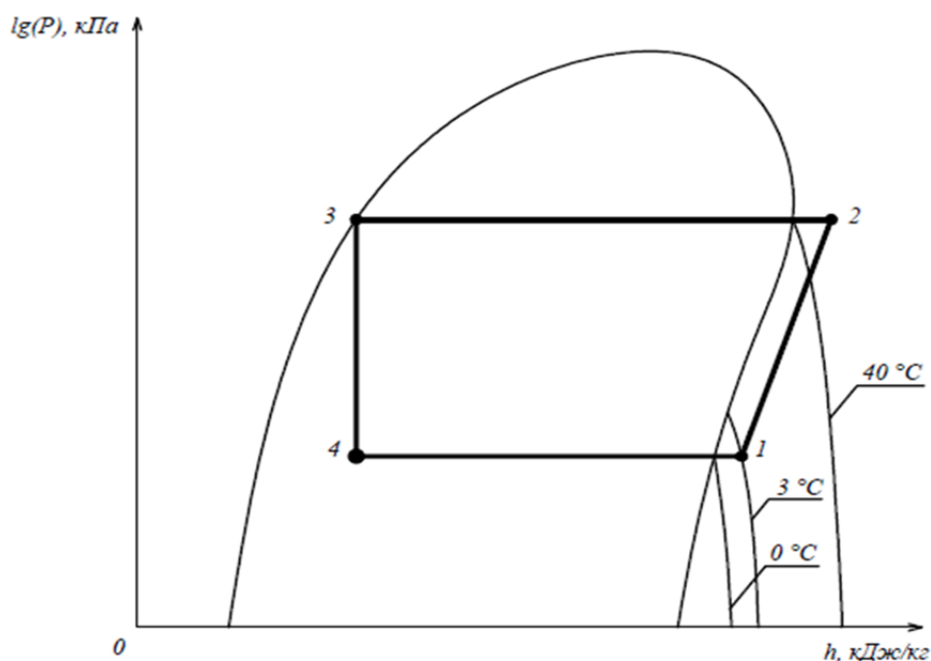


Диаграмма с параметрами рассчитываемого цикла:

1 — вход в компрессор; 2 — выход из компрессора; 3 — окончание процесса конденсации, начало дросселирования; 4 — выход из дросселя

Для учета глайда в качестве температуры кипения смеси взята температура кипения на кривой пара, для учета конденсации — на кривой жидкости. Однако, при большем глайде после дросселирования достигается более низкая температура, что ведет к потерям и изменению холодильного коэффициента. Поэтому, расчет цикла производили в наихудших, с точки зрения учета глайда, условиях. В дальнейшем планируется доработать модель и провести экспериментальные исследования на стенде.

Кратко алгоритм работы программы можно описать следующим образом. Шаг 1. Произвести расчеты для трехкомпонентных смесей введенных хладаген-

тов. Шаг 2. Проверить все комбинации. Шаг 3. Перебрать все возможные варианты долей для трехкомпонентной смеси с шагом 2 %. Поскольку допускалась возможность мольной доли равной 0, то смесь могла вырождаться в двухкомпонентную или в чистое вещество. Для расчета реальных свойств веществ, смесей использовали модуль Refprop.

Программа позволяет составлять список смесей, выбранных по максимуму холодильного коэффициента, максимуму объемной холодопроизводительности, минимуму степени сжатия в компрессоре, а также по параметрам «похожести» на хладон R12 или R22. Параметр сходства определяют путем сравнения рассчитываемой смеси по объемной холодопроизводительности, давлению кипения и степени сжатия в компрессоре с данными параметрами исходного вещества. Чтобы влияние каждого из параметров было одинаковым, все они приведены к 1-му порядку. Используемая формула является аналогичной расчету расстояния между точками в трехмерном пространстве. Для R12 формула выглядит следующим образом:

$$L_{R12} = \sqrt{(q_v - q_{vR12})^2 + (\pi - \pi_{R12})^2 + (P_{\text{кип}} - P_{\text{кип}R12})^2},$$

где q_v и q_{vR12} — объемная холодопроизводительность смеси и хладона R12, соответственно; π и π_{R12} — степень сжатия смеси и R12, соответственно; $P_{\text{кип}}$ и $P_{\text{кип}R12}$ — давление кипения смеси и R12, соответственно.

Расчет был произведен для трех вариантов смеси:

1) веществ, нормальная температура кипения которых ниже 0 °С, а критическая точка выше 40 °С (аммиак, бутан, изобутен, карбонил сульфид, диметиловый эфир, изобутан, бутен, C4F10, пропан, пропилен, R115, R12, R124, R125, R134a, R142b, R143a, R152a, R218, R22, R227ea, R236fa, RC318, SO₂, трансбутен, CF3I, R1234yf);

2) веществ из первого варианта, за исключением запрещенных или запрещаемых, токсичных (аммиак, бутан, изобутен, диметиловый эфир, изобутан, бутен, C4F10, пропан, пропилен, R125, R134a, R143a, R152a, R218, R227ea, R236fa, RC318);

3) веществ из второго варианта, за исключением горючих (C4F10, R125, R134a, R143a, R152a, R218, R227ea, R236fa, RC318).

По результатам работы программы, были выявлены наилучшие смеси (табл. 1–5), определяемые на основании нескольких критериев (параметров). Для первого варианта смеси критерием эффективности является максимальный холодильный коэффициент ε_{max} , для второго и третьего вариантов — параметры сходства с хладонами L_{R12} и L_{R22} .

Кроме того выявлен холодильный коэффициент ε_r для чистых хладагентов в данном цикле: 5,62 — R12; 5,51 — R22; 5,54 — R134a.

Таблица 1

Данные для первого варианта смесей исходя из параметра ε_{\max}

Состав смеси	Соотношение веществ в смеси, %	Теоретический холодильный коэффициент ε_T	Объемная холодопроизводительность q_v , кДж/м ³	Степень сжатия в компрессоре π	Давление кипения $P_{\text{кип}}$, кПа	L_{R12}	L_{R22}
Бутен RC318 Трансбутен	76 18 6	6,06	944,6	3,62	125,3	11,06	23,78
R142b SO ₂	50 50	5,92	1209	3,85	139,8	2,02	4,22
Аммиак Бутан Диметиловый эфир	76 16 8	5,92	4167	3,23	550	3,23	1,03
C ₄ F ₁₀ SO ₂	8 92	5,91	1427	3,97	158,4	1,83	3,97
RC318 SO ₂	8 92	5,89	1450	3,99	159,3	1,82	3,96

Таблица 2

Данные для второго варианта смесей исходя из параметра L_{R12}

Состав смеси	Соотношение веществ в смеси, %	Теоретический холодильный коэффициент ε_T	Объемная холодопроизводительность q_v , кДж/м ³	Степень сжатия в компрессоре π	Давление кипения $P_{\text{кип}}$, кПа	L_{R12}	L_{R22}
Диметиловый эфир R1234yf	28 72	5,4	1993	3,24	310,7	0,13	2,29
Аммиак R1234yf	8 92	5,34	1981	3,25	312,5	0,16	2,28
Изобутан R134a R152a	32 18 50	5,49	2051	3,29	305,6	0,18	2,3
Диметиловый эфир Изобутан R152a	18 24 58	5,61	2055	3,27	298,1	0,19	2,36
Изобутан R152a R218	30 68 2	5,52	2024	3,29	298,9	0,2	2,37

Таблица 3

Данные для второго варианта смесей исходя из параметра L_{R22}

Состав смеси	Соотношение веществ в смеси, %	Теоретический холодильный коэффициент ε_T	Объемная холодопроизводительность q_v , кДж/м ³	Степень сжатия в компрессоре π	Давление кипения $P_{\text{кип}}$, кПа	L_{R12}	L_{R22}
Аммиак Пропан Пропилен	32 4 64	5,53	3293	3,08	498,1	2,28	0
Аммиак Пропилен R152a	32 66 2	5,52	3302	3,09	498,4	2,29	0,01
Аммиак Бутан Пропилен	32 2 66	5,55	3290	3,07	497	2,27	0,01
Аммиак Пропилен R134a	32 64 4	5,5	3293	3,1	497,6	2,27	0,02
Аммиак Диметиловый эфир Пропилен	26 34 40	5,49	3287	3,11	498,7	2,28	0,03

Таблица 4

Данные для третьего варианта смесей исходя из параметра L_{R12}

Состав смеси	Соотношение веществ в смеси, %	Теоретический холодильный коэффициент ε_T	Объемная холодопроизводительность q_v , кДж/м ³	Степень сжатия в компрессоре π	Давление кипения $P_{\text{кип}}$, кПа	L_{R12}	L_{R22}
R152a R218	70 30	5,09	2026	3,46	317,4	0,36	2,24
R143a R152a	6 94	5,48	2015	3,55	275,4	0,55	2,61
R218 R227ea	64 36	4,23	1631	3,42	331,3	0,56	2,38
R218 R236fa RC318	84 12 4	4,07	1607	3,46	338	0,62	2,35
R218 R236fa	84 16	4,07	1613	3,47	337,5	0,63	2,36

Данные для третьего варианта смесей исходя из параметра L_{R22}

Состав смеси	Соотношение веществ в смеси, %	Теоретический холодильный коэффициент ε_T	Объемная холодопроизводительность q_v , кДж/м ³	Степень сжатия в компрессоре π	Давление кипения $P_{\text{кип}}$, кПа	L_{R12}	L_{R22}
R143a R152a	78 22	4,9	2979	3,24	509,8	2,23	0,37
R134a R143a	20 80	4,87	2951	3,23	511,5	2,23	0,4
R143a R227ea R236fa	90 8 2	4,64	2871	3,27	521,9	2,3	0,52
R143a R227ea	88 12	4,66	2855	3,25	520,7	2,28	0,52
R143a R236fa RC318	94 4 2	4,6	2899	3,3	526,2	2,35	0,53

Исходя из данных приведенных в таблицах видно, что, несмотря на отсутствие глайда чистых хладагентов, наиболее эффективными, с точки зрения учета холодильного коэффициента, являются смеси:

- бутен, RC318, трансбутен (76, 18, 6 %);
- R142b, SO₂ (50, 50 %);
- аммиак, бутан, диметиловый эфир (76, 16, 8 %).

Наиболее перспективной является третий вариант смеси, поскольку в ней нет запрещенных или ограниченных по производству веществ, в отличие от первого и второго варианта смесей, где таковыми являются элементы трансбутен и R142b. Кроме того, были выявлены смеси схожие по характеристикам с хладагентами R12 и R22.

Для горючих веществ более схожей с R12 является смесь диметилового эфира и R1234yf (28, 72 %), а для R22 — смесь аммиака, пропана и пропилена (32, 4, 64 %). Для негорючих веществ наиболее схожей с R12 является смесь R152a и R218 (70, 30 %), а в случае с R22 — смесь R143a; R152a (78, 22 %).

Результаты, полученные с помощью разработанной программы, позволяют сделать вывод об эффективности смесевых хладагентов, а также выбрать необходимую смесь, исходя из особенностей ее дальнейшего применения. Отметим также, что изменение состава циркулирующего хладагента позволяет повысить коэффициент преобразования установки и обеспечивает возможность регулирования ее производительности.

Литература

1. *Распоряжение* Правительства Российской Федерации от 20.11.2014 г. № 2327-Р.
2. *Постановление* Правительства Российской Федерации от 26.06.2015 г. № 632 «О введении временного количественного ограничения на ввоз озоноразрушающих веществ в Российскую Федерацию в 2015 году».
3. *Гаранов С.А., Воронов В.А., Заболотный Д.Ю., Журлова П.Ю.* Стенд парокомпрессионного теплового насоса // *Инженерный журнал: наука и инновации. Электр. журн.* 2016. № 1(49). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1460
4. *Журлова П.Ю., Самсоненков А.Е., Шереметьев С.С., Гаранов С.А.* Повышение энергоэффективности теплового насоса «вода–вода» // *Наука сегодня: реальность и перспективы. Сб. докл. Международной научно-практической конференции.* Научный центр «Диспут». Вологда. 2016. С. 28–31.
5. *Radermacher R., Hwang Y.* Vapor compression heat pumps with refrigerant mixtures. Taylor and Francis. 2005. 328 p.
6. *Kim M., Kim M. S., Kim Y.* Experimental study on the performance of a heat pump system with refrigerant mixtures' composition change // *Energy.* 2004. Vol. 29. No. 7. P. 1053–1068. DOI: 10.1016/j.energy.2003.12.004
7. *Мезенцева Н.Н.* Эффективность работы парокомпрессионных тепловых насосов на неазеотропных смесевых хладагентах // *Теплофизика и аэромеханика.* 2011. Т. 18. № 2. С. 335–342.
8. *Мезенцева Н.Н., Мезенцев И.В.* Исследование эффективности термодинамических циклов со ступенчатым сжатием на неазеотропных хладагентах // *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии.* 2013. № 2. С. 56–59.
9. *Огуречников Л.А., Мезенцева Н.Н.* Неазеотропные смеси в тепловых насосах. Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 7. С. 110–115.
10. *Протопопов К.В., Жиребный И.П., Гаранов С.А.* Способы регулирования производительности установок кондиционирования воздуха с режимом теплового насоса // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2014. № 12 (657). С. 76–82. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-12-76-83

Воронов Владимир Андреевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией кафедры «Холодильная криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Журлова Полина Юрьевна — магистрант кафедры «Холодильная криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Заболотный Денис Юрьевич — студент кафедры «Холодильная криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Шереметьев Станислав Сергеевич — магистрант, ассистент кафедры «Холодильная криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SELECTING REFRIGERANT BLENDS FOR VAPOUR-COMPRESSSION REFRIGERATION SYSTEMS AND HEAT PUMPS

V.A. Voronov

P.Yu. Zhurlova

D.Yu. Zabolotnyy

S.S. Sheremetev

zabdenis1996@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article describes specific refrigerant groups and a method of comparing them to the R12 and R22 freons. We present a program for comparing refrigerants, including refrigerant blends, in order to select the most efficient ones. We describe working cycles, algorithm and relevance of the program. We supply program operation results. We present the best refrigerant blends according to the criteria described. We base our recommendations for further application of the blends chosen on these results

Keywords

Refrigerant, refrigerant blend, freon, ozone depleting potential, global warming potential

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 20.11.2014 g. № 2327-R [RF government edict no. 2327-R dated 20.11.2014].
- [2] Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 26.06.2015 g. № 632 «O vvedenii vremennogo kolichestvennogo ogranicheniya na vvoz ozonorazrushayushchikh veshchestv v Rossiyskuyu Federatsiyu v 2015 godu». [RF government regulation no. 632 dated 26.06.2015 "On imposition of temporary quantitative restrictions on ozone depleters import in Russian Federation in 2015"].
- [3] Garanov S.A., Voronov V.A., Zabolotnyy D.Yu., Zhurlova P.Yu. Vapor compression heat pump stand *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 1(49). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1460
- [4] Zhurlova P.Yu., Samsonenkov A.E., Sheremet'yev S.S., Garanov S.A. [Energy saving elevation for "water-water" heat pump]. *Nauka segodnya: real'nost' i perspektivy. Sb. dokl. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Science today: reality and prospects. Proc. Int. sci.-practice conf.]. Vologda. "Disput' scientific center, 2016. pp. 28–31 (in Russ.).
- [5] Radermacher R., Hwang Y. Vapor compression heat pumps with refrigerant mixtures. Taylor and Francis. 2005. 328 p.
- [6] Kim M., Kim M. S., Kim Y. Experimental study on the performance of a heat pump system with refrigerant mixtures' composition change. *Energy*, 2004, vol. 29, no. 7, pp. 1053–1068. DOI: 10.1016/j.energy. 2003.12.004
- [7] Mezentseva N.N. Efficiency of vapor compression heat pumps based on non-azeotropic refrigerant mixtures. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 335–342. (Eng. version of journal: *Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 323–330.)
- [8] Mezentseva N.N., Mezentsev I.V. Investigation of efficiency of thermodynamic cycles with stepped compression using the non-azeotropic refrigerants. *Sovremennaya nauka: idei, issle-*

dovaniya, rezul'taty, tekhnologii [Modern science: Researches, Ideas, Results, Technologies], 2013, no. 2, pp. 56–59 (in Russ.).

[9] Ogurechnikov L.A., Mezentseva N.N. Nonazeotropic mixtures in heat pumps. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology (ISJAE)], 2008, no. 7, pp. 110–115 (in Russ.).

[10] Protopopov K.V., Zhirebnyy I.P., Garanov S.A. Efficiency control methods for air conditioning systems with heat pumps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2014, pp. 12 (657), pp. 76–82. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-12-76-83

Voronov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Zhurlova P.Yu. — graduate student of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Zabolotnyy D.Yu. — student of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sheremetev S.S. — graduate student, Assist. Lecturer of Refrigeration, Cryogenic Engineering Department, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.