

Теплопроводность хладагента R401В. Эксперимент и обобщение

Ю.А. ЛАПТЕВ, О.Б. ЦВЕТКОВ
Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Хладагент R401В – зеотропная смесь хладагентов R22 (массовая доля 61%), R152а (11%) и R124 (28%). Это переходное рабочее вещество холодильной техники можно использовать для замены R12 в эксплуатируемых холодильных установках умеренного холода. Хладагент R401В в промышленных масштабах под торговой маркой SUVA MP 66 производит фирма «Дюпон» [2, 10].

Теплопроводность R401В экспериментально исследована в интервале температур 291,77...366,81 К и давлений 0,23...9,4 МПа. Реализован метод коаксиальных цилиндров в стационарном режиме. Аттестацию установки во всем температурном интервале проводили по толуолу, аргону и хладагенту R22. Рабочий зазор измерительной ячейки составил 0,22 мм. Подробное описание установки и методики проведения эксперимента содержится в [3]. Опытные значения коэффициентов теплопроводности учитывают все присущие методу ко-

Таблица 1
Экспериментальные значения теплопроводности газообразного хладагента R401В

T, К	p, МПа	λ , Вт/(м·К)
291,77	0,23	0,0116
291,96	0,23	0,0117
292,25	0,23	0,0116
292,83	0,23	0,0118
298,39	0,25	0,0127
298,46	0,25	0,0127
298,56	0,25	0,0127
298,66	0,25	0,0127
303,55	0,25	0,0133
303,77	0,25	0,0133
304,05	0,25	0,0131
304,17	0,25	0,0134
316,36	0,25	0,0144
316,43	0,25	0,0144
316,35	0,25	0,0144
316,35	0,25	0,0144
340,16	0,29	0,0169
340,17	0,29	0,0168
340,19	0,29	0,0168
340,16	0,29	0,0169
360,37	0,30	0,0189
360,36	0,30	0,0190
360,39	0,30	0,0190
360,43	0,30	0,0190

Heat conductivity of R401B – a transition working substance which can be used instead of R12 in the existing refrigerating installations – has been experimentally investigated. The results of the experiments have been generalized and presented in analytical form. The error of measurement has been assessed.

аксиальных цилиндров поправки. Погрешность опытных данных по теплопроводности газовой фазы оценена величиной 1,5%; по теплопроводности жидкости – до 3%.

Для исследований использован промышленный образец хладагента R401В фирмы «Дюпон». Неабсорбированные газы (объемная доля 1,5%) были удалены из образца после его многократного замораживания в жидком азоте.

По теплопроводности газообразного хладагента R401В получено 24 экспериментальных значения (табл. 1), по теплопроводности насыщенной жидкости – 34 значения (табл. 2), а по теплопроводности жидкости под давлением и плотного пара в интервале температур 296,79...358,87 К и давлений до 9,4 МПа – 38 значений (табл. 3).

Теплопроводность хладагента R401В в газообразном состоянии линейно возрастает с температурой:

$$\lambda_1 = a_0 + a_1 T. \quad (1)$$

где λ_1 – теплопроводность, Вт/(м·К); a_0, a_1 – коэффициенты уравнения; T – температура, К.

На основе измерений, выполнен-

ных в настоящей работе, получены коэффициенты уравнения (1) $a_0 = 0,0184$; $a_1 = 1,037 \cdot 10^{-4}$. Погрешность аппроксимации не более $\pm 0,8\%$.

Рекомендуемые значения теплопроводности в состоянии разреженного газа, рассчитанные по уравнению (1), приведены в табл. 4. Погрешность рекомендуемых данных оценивается нами как 2%. Измерения теплопроводности газообразного хладагента R401В не подтвердили данных [2], полученных расчетом. Расхождение до 15,8% наблюдается при температуре 363 К.

Полином второй степени позволил описать теплопроводность насыщенной жидкости R401В:

$$\lambda_n = c_0 + c_1 T + c_2 T^2. \quad (2)$$

Значения коэффициентов полинома равны: $c_0 = 0,31126$; $c_1 = -1,02837 \cdot 10^{-3}$; $c_2 = 9,59159 \cdot 10^{-7}$. Отклонение опытных значений теплопроводности от расчетных не более 0,7%.

При обобщении данных по теплопроводности тройных растворов на линии насыщения в работах [1, 9] использована зависимость, полученная

Таблица 2
Экспериментальные значения теплопроводности насыщенной жидкости R401В

T, К	p, МПа	λ , Вт/(м·К)	T, К	p, МПа	λ , Вт/(м·К)
294,96	0,98	0,0918	320,19	1,99	0,0805
295,15	0,98	0,0914	320,20	2,0	0,0805
295,29	0,98	0,0914	324,99	2,02	0,0785
295,40	0,98	0,0911	325,01	2,02	0,0782
295,91	1,15	0,0912	343,71	2,85	0,0708
296,17	1,30	0,0910	343,73	2,87	0,0707
297,45	1,24	0,0899	359,61	3,67	0,0654
297,95	1,25	0,0895	359,61	3,67	0,0653
298,05	1,25	0,0895	359,61	3,69	0,0647
299,38	1,37	0,0895	359,62	3,7	0,0648
299,53	1,395	0,0895	366,74	4,0	0,0637
299,68	1,40	0,0893	366,77	4,24	0,0638
299,75	1,43	0,0893	366,79	4,0	0,0638
311,36	1,45	0,0842	366,80	4,0	0,0632
311,36	1,46	0,0842	366,80	4,0	0,0629
311,36	1,47	0,0840	366,81	4,0	0,0631
311,38	1,48	0,0842	366,81	4,0	0,0629

О.Б. Цветковым для бинарных жидких смесей хладагентов [6]:

$$\lambda_{ж.см} = \lambda_{ад} \{1 - \beta x_1 x_2 [1 - (x_1 + x_2)]\}, \quad (3)$$

где $\lambda_{ад}$ — теплопроводность раствора, рассчитанная по правилу аддитивности; β — коэффициент; x_1, x_2 — массовые доли компонентов.

Коэффициент β для теплопроводности тройной смеси R401B оказался близким к единице и слабо зависящим от температуры:

$$\beta = -1,0602 - 7,0846 \cdot 10^{-3} T, \quad (4)$$

где T — температура, К.

При расчете аддитивной теплопроводности $\lambda_{ад}$ использовали апробированные опубликованные данные по теплопроводности жидких хладагентов R22 [6], R152a [3, 7] и R124 [3, 8]. Максимальное расхождение опытных и рассчитанных по уравнениям (3) и (4) для R401B данных не превысило 3 %.

Теплопроводность бинарных и тройных растворов в состоянии насыщения по рекомендациям [11] можно описать соотношением

$$(\lambda_{ж.см})^n = \sum x_i (\lambda_{жи})^n, \quad (5)$$

где $\lambda_{жи}$ — теплопроводность i -го компонента раствора; n — показатель степени; $n = -0,65$.

Приведенные в табл. 5 значения теплопроводности рекомендуются нами для R401B в состоянии насыщенной жидкости для температур 233,15...373,15 К. Рекомендуемые значения согласуются с расчетом [2] только до 323 К. С ростом температуры расхождение увеличивается и достигает 9,8 % при 363 К. Расчеты по правилу аддитивности и по уравнению (5) практически не различаются (в пределах $\pm 1,5$ %). Однако эти данные неприемлемы, поскольку расположены ниже экспериментальных данных настоящей работы, причем расхождение достигает 19 %.

Для расчета теплопроводности насыщенного пара R401B $\lambda_{п.см}$ использовано уравнение, основанное на правиле аддитивности [11]:

$$\lambda_{п.см} = \sum y_i \lambda_{пи}, \quad (6)$$

где y_i — мольная концентрация i -го компонента; $\lambda_{пи}$ — теплопроводность насыщенного пара компонентов смеси.

Рассчитанные по уравнению (6) значения теплопроводности насыщен-

ных паров сведены в табл. 6 и могут быть оценены как предварительные. Значения теплопроводности $\lambda_{пи}$ компонентов R401B приняты по данным справочных изданий [2, 3, 4, 6].

Результаты измерений теплопроводности R401B в однофазной области представлены уравнением, где использованы параметры, измеряемые непосредственно в эксперименте, — давление и температура:

$$\lambda_{p,T} = d_0 + d_1 p + d_2 T + d_3 pT, \quad (7)$$

где d_0, d_1, d_2, d_3 — коэффициенты; p — давление, МПа; T — температура, К.

Параметры уравнения (7) оказались равными:

$$d_0 = 0,22548; d_1 = -0,00145; d_2 = -0,00045; d_3 = 6,59961 \cdot 10^{-6}. \text{ Расхождения не превышают } 3\% \text{ для всей выборки.}$$

Рассчитанные нами по уравнению (7) значения теплопроводности R401B приведены в табл. 7. Отклонения рекомендуемых данных от исходных опытных значений в целом не превышают уровня оцененной нами погрешности эксперимента.

Уравнение в форме изотерм Тейта, связывающее избыточную теплопроводность (относительно теплопроводности жидкости на линии насыщения) и давление, оказалось возможным использовать для обобщения данных по теплопроводности R401B в состоянии жидкости под давлением:

$$\lambda_{p,T} - \lambda_n = A \ln[(B + p)/(B + p_s)]. \quad (8)$$

где p_s — давление насыщения.

Параметры A и B зависят для R401B от температуры и с достаточной точностью аппроксимируются уравнениями вида

$$A = -0,05116 + 0,0002081 T; \quad (9)$$

$$B = -17,541 + 0,106044 T. \quad (10)$$

Качество описания исходных данных уравнениями (8) — (10) в интервале температур 273,15...373,15 К оказалось несколько хуже, чем с помощью уравнения (7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михно Ю.А., Геллер В.З. Теплопроводность жидких многокомпонентных хладагентов на линии насыщения // Холодильная техника. 1984. № 11.
2. Промышленные фторорганические продукты: Справочник/

Таблица 3
Экспериментальные значения теплопроводности R401B в однофазной области

T, K	p, МПа	λ , Вт/(м·К)
296,79	1,70	0,0914
296,85	1,57	0,0914
297,10	1,75	0,0904
299,38	1,37	0,0895
299,53	1,395	0,0895
299,68	1,40	0,0893
299,75	1,43	0,0893
300,45	7,83	0,0930
300,46	4,43	0,0908
300,46	4,52	0,0906
300,47	7,75	0,0930
300,47	4,50	0,0916
300,50	7,89	0,0931
320,19	3,55	0,0817
320,19	3,60	0,0817
320,20	3,85	0,0819
320,21	3,95	0,0822
322,66	1,365	0,0156
322,67	1,40	0,0156
322,67	1,64	0,0159
322,67	1,64	0,0159
338,94	1,20	0,0165
338,94	1,20	0,0165
338,94	1,50	0,0168
338,95	1,575	0,0169
338,95	1,60	0,0170
339,42	5,95	0,0765
339,43	9,40	0,0791
339,44	6,00	0,0765
339,44	6,05	0,0762
339,44	6,12	0,0764
339,44	9,23	0,0791
339,45	6,10	0,0762
358,57	1,19	0,0177
358,60	1,19	0,0177
358,86	8,75	0,0719
358,87	8,80	0,0719
358,87	8,85	0,0716

Таблица 4
Рекомендуемые значения теплопроводности хладагента R401B в состоянии разреженного газа

T, K	λ , Вт/(м·К)
273,15	0,0099
283,15	0,0110
293,15	0,0120
303,15	0,0130
313,15	0,0141
323,15	0,0151
333,15	0,0161
343,15	0,0172
353,15	0,0182
363,15	0,0192
373,15	0,0203

Таблица 5
Рекомендуемые значения теплопроводности R401B в состоянии насыщенной жидкости

T, K	λ , Вт/(м·К)	T, K	λ , Вт/(м·К)
233,15	0,1236	313,15	0,0833
243,15	0,1179	323,15	0,0790
253,15	0,1124	333,15	0,0751
263,15	0,1071	343,15	0,0711
273,15	0,1019	353,15	0,0677
283,15	0,0970	363,15	0,0640
293,15	0,0922	373,15	0,0611
303,15	0,0876		

МИКОЛАЙСЬКА ДЕРЖАВНА
ОБЛАСНА УНІВЕРСАЛЬНА
НАУКОВА БІБЛІОТЕКА
ім. О. Гмирьове

Теплопроводность насыщенного пара R401B

T, K	λ , Вт/(м·К)	T, K	λ , Вт/(м·К)	T, K	λ , Вт/(м·К)
203,15	0,0052	263,15	0,0093	323,15	0,0149
213,15	0,0059	273,15	0,0100	333,15	0,0163
223,15	0,0065	283,15	0,0108	343,15	0,0179
233,15	0,0072	293,15	0,0117	353,15	0,0201
243,15	0,0079	303,15	0,0127	263,15	0,0234
253,15	0,0085	313,15	0,0137		

Таблица 6

Теплопроводность хладагента R401B в однофазной области

T, K	λ , Вт/(м·К), при p, МПа									
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
273,15	0,1023	0,1026	0,1029	0,1032	0,1035	0,1038	0,1041	0,1044	0,1047	0,1050
283,15	0,0973	0,0977	0,0981	0,0986	0,0990	0,0994	0,0998	0,1002	0,1006	0,1011
293,15	0,0925	0,0930	0,0935	0,0940	0,0946	0,0951	0,0956	0,0961	0,0966	0,0972
303,15	0,0878	0,0884	0,0890	0,0896	0,0902	0,0908	0,0914	0,0920	0,0926	0,0932
313,15	—	0,0837	0,0844	0,0851	0,0858	0,0865	0,0872	0,0879	0,0886	0,0893
323,15	—	0,0794	0,0802	0,0809	0,0817	0,0824	0,0832	0,0839	0,0847	0,0854
333,15	—	0,0753	0,0761	0,0768	0,0776	0,0784	0,0792	0,0800	0,0808	0,0815
343,15	—	—	0,0719	0,0727	0,0735	0,0743	0,0752	0,0760	0,0768	0,0776
353,15	—	—	0,0678	0,0687	0,0695	0,0704	0,0712	0,0720	0,0729	0,0737
363,15	—	—	—	0,0646	0,0655	0,0663	0,0672	0,0681	0,0689	0,0698
373,15	—	—	—	—	0,0614	0,0623	0,0623	0,0641	0,0650	0,0659

Таблица 7

Б.Н. Максимов, В.Г. Барабанов, И.Я. Серушкин и др. — Л.: Химия. Ленингр. отд., 1996.

3. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов/Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. Цветков О. Б. Теплопроводность холодильных агентов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984.

5. Цветков О.Б., Лантев Ю.А. Методы расчета свойств переноса жидких холодильных агентов: Учебное пособие. — Л.: ЛТИХП/ЛТИ, 1990.

6. Цветков О.Б., Лантев Ю.А., Пономарев П.В. Дифторхлорметан (хладон-22). Коэффициенты теплопроводности в диапазоне температур 173...473 К и давлении до 5 МПа/Таблицы стандартных справочных данных, ГСССД 157-91 — М.: Изд-во стандартов, 1991.

7. Tausher W. Messung der Wärmeleitfähigkeit flüssiger Kältemittel mit einem instationären Hitzdrahtmethode // ASHRAE J. — 1969. — Vol. 11, N 1.

8. Thermal conductivity of alternative fluorocarbons in liquid phase/J. Yata, M. Hori, T. Kurahashi, T. Minamijama // Fluid Phase Equilib. — 1992. — Vol. 80.

9. Thermal conductivity of multi-component working media used in cryogenic refrigeration systems/V.A. Grigoryev, S.V. Ilyshenko, V.Z. Geller, M.A. Likhzky // Thermodynamic properties/ Proc. 1st Asian Thermophysical Conference, Beijing, China. — 1986.

10. Thermodynamic properties of SUVA. MP66. Techn. Inform., T-MP66-SI, DU PONT, 1993.

11. Spindler K., Hofmann N., Hahne W. Wärmeleitfähigkeit von HFKW-Gemischen // Luft- und Kältetechnik. — 1997. — N 1.



ХОЛОДИЛЬНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

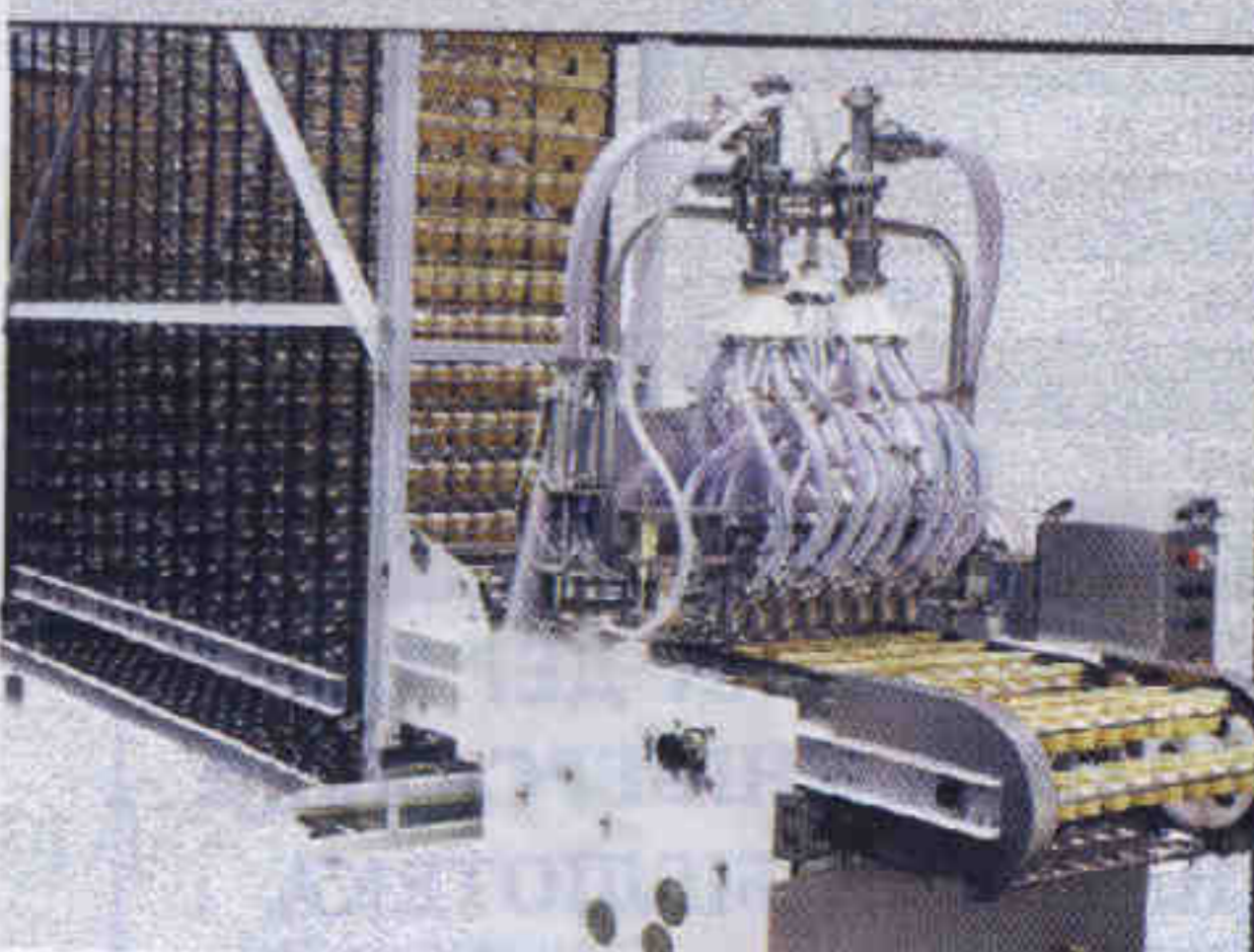
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО, МОНТАЖ



КОМПРЕССОРНЫЕ АГРЕГАТЫ
ВОДООХЛАЖДАЮЩИЕ УСТАНОВКИ
СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ



камеры
склады хранения
терминалы "под ключ"



ЗАКАЛОЧНЫЕ ТУННЕЛИ
ФАСОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОРОЖЕНОГО

141070, Московская область, г. Королев, ул. Циолковского, 2А
тел.: 095 502-8171, 502-8170, www.prostor.ru, e-mail: info@prostor.ru