

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ УРАВНЕНИЙ ПЕНГА—РОБИНСОНА И GERG-2008 СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА ДЛЯ РАСЧЕТА СВОЙСТВ ФРЕОНОВ ДЛЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И КОМПРЕССОРОВ

М. И. Соколов, Ю. В. Кожухов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Проведено исследование уравнений состояния реального газа Пенга—Робинсона и GERG-2008 применительно к расчетам фреонов R404A, R408A и R410A. В ходе исследования были рассчитаны четыре параметра фреона на линии насыщенного пара: давление насыщенных паров на линии насыщения при некоторой температуре фреона, плотность фреона при давлении насыщения и некоторой температуре, энтальпия и энтропия при тех же давлениях и температуре. Данные, полученные из расчета фреона по вышеуказанным уравнениям, были сравнены с экспериментальными данными по каждому из вышеуказанных фреонов. В результате работы были получены данные по оценке точности уравнений состояния Пенга—Робинсона и GERG-2008 для каждого из трех фреонов, дана оценка эффективности применения этих уравнений, а также даны рекомендации по расчетам и применению данных уравнений при проектировании и математическом моделировании холодильных машин.

Ключевые слова: фреон, реальный газ, уравнение состояния реального газа, термодинамический расчет, холодильная техника, холодильный компрессор.

Введение

При проектировании холодильных машин и компрессоров, а также при расчете уже существующих машин, в целях создания математической модели или же модели-двойника агрегата, в том числе и на основе CFD-моделирования реального газа [1–4], а также при проведении поверочных расчётов, возникает потребность в использовании специализированных уравнений состояния реального газа, в том числе такого холодильного агента, как фреон. Уравнения состояния реального газа Пенга—Робинсона и GERG-2008 применяются в расчетах компрессорного оборудования для нефтегазовой, химической отраслей, а также для холодильных установок, при замене сменной проточной части центробежных компрессоров [5, 6]. В данной работе приводится исследование применимости этих уравнений к задачам расчета низкотемпературных хладагентов в холодильных машинах, использующихся при проектировании холодильной техники, компрессоров и нефтегазового оборудования [7–11].

Уравнение состояния газа Менделеева—Клапейрона, оно же уравнение состояния идеального газа, имеет широкую базу экспериментальных подтверждений для области давлений, незначительно превышающих атмосферное давление, а также для диапазона температур, близких к атмосферным и диапазону плотностей газов, близких к плотности атмосферного воздуха. Таким образом, для описания многих процессов и явлений, а также для расчета характеристик агрегатов, работающих с воздухом или близким по плотности газом, применение уравнения Менделеева—Клапейрона яв-

ляется эффективным. Однако при описании или расчете газов, сильно отличающихся по свойствам от атмосферного воздуха, уравнение Менделеева—Клапейрона становится неэффективным как исходя из недостаточной экспериментальной базы, так и учитывая те свойства, которые газ приобретает при высоких давлениях, низких температурах и высокой плотности. Такие свойства, которые газ приобретает при высоких давлениях, низких температурах и высоких плотностях, можно обозначить как свойства реального газа, и возникают они вследствие взаимодействия молекул газа между собой. Для описания реальных газов, проявляющих вышеуказанные свойства, необходимо применять уравнения состояния реального газа [12–16].

В данной работе рассмотрено два уравнения реального газа: уравнение состояния реального газа Пенга—Робинсона и модель GERG-2008 Кунца—Вагнера. Для проверки эффективности и точности данных уравнений учета реальности газа при проектировании и расчете холодильных машин будет проведена верификация расчётных данных, полученных из решения данных уравнений, с экспериментальными данными по трем фреонам: R404A, R408A, R410A [12, 17, 18].

Важно отметить, что различные уравнения состояния реального газа имеют различную математическую структуру, что сказывается как на диапазоне их применимости, под которым понимается некоторый диапазон температур, давлений и плотностей газа, в которых уравнение получило экспериментальное обоснование, так и на точности самого решения в каждой отдельно взятой точке рабочего процесса [19]. Для анализа и вычисления погрешности расчета каждым из уравнений использу-

ется среднее значение отклонения расчета по всему объему экспериментальных данных [18, 20].

Исследования проводились на экспериментальной кривой насыщенного пара для каждого вышеуказанного фреона при диапазоне температур от -50 до 50 градусов Цельсия. Результаты расчета по каждому из предоставленных уравнений сравнивались с экспериментальными данными с целью выявления средней погрешности расчета каждого из них.

Методы решения

1. Уравнение состояния реального газа Пенга–Робинсона (PR).

Уравнение состояния реального газа Пенга–Робинсона является модификацией уравнения состояния реального газа Редлиха–Квонга.

Уравнение Редлиха–Квонга в стандартной форме имеет следующий вид [7, 12]:

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a}{T^{0.5} \cdot v \cdot (v + b)}, \quad (1)$$

где p — плотность реального газа, T — температура реального газа, v — удельный объем реального газа, R — индивидуальная газовая постоянная реального газа, a и b — коэффициенты уравнения Редлиха–Квонга.

Как видно из формулы (1), уравнение Редлиха–Квонга в своей основе имеет уравнение, определяющее зависимость между тремя величинами: плотность, давление и температура, связанными между собой при помощи эмпирических коэффициентов, зависящих от критических параметров газа и экспериментальных данных (эмпирических коэффициентов). Такой подход к составлению уравнения реального газа способствует высокой точности решений данного уравнения только в ограниченном диапазоне давлений, температур и плотностей газа [18, 20, 21].

Для расширения данного диапазона, а также повышения точности расчета по уравнению Д.-Ю. Пенг (D.-Y. Peng) и Д. Б. Робинсон (D. P. Robinson) разработали в 1976 г. модифицированное уравнение Редлиха–Квонга, названное в их честь уравнением Пенга–Робинсона [22]. В стандартном виде данное уравнение выглядит следующим образом [7, 12]:

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a}{v \cdot (v + b) + b \cdot (v - b)}. \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициенты, связывающие три основные величины, а именно величины давления газа, температуры газа и плотности газа, зависят не только от эмпирических коэффициентов и критических параметром, но также и от других величин, увеличивающих точность расчета, таких как фактор ацентричности и текущая температура газа. Уравнение Пенга–Робинсона не редко применяется в газовой, нефтегазовой и нефтеперерабатывающей промышленности для описания различных свойств и состояний реального газа, вплоть до жидкого состояния. Данное уравнение показало высокую эффективность и точность расчета для очень широкого диапазона температур и давлений как для различных форм углеводородов, так и для различных чистых веществ и газов [7].

2. Модель GERG-2008 Кунца–Вагнера (GERG-2008).

Уравнение (модель) GERG-2008 является модификацией уравнения GERG-91, разработанного группой европейских исследователей на основе большого объема экспериментальных данных с применением стандартных вириальных уравнений.

В стандартной форме данное уравнение описывает связь коэффициента сжимаемости с молярной плотностью газа и выглядит следующим образом [17]:

$$z = 1 + B_m \cdot \rho_m + C_m \cdot \rho_m^2, \quad (3)$$

где z — коэффициент сжимаемости реального газа, ρ_m — молярная плотность реального газа, B_m , C_m — коэффициенты уравнения GERG-2008.

Наиболее примечательной особенностью данного метода является то, что для расчета газа по уравнению (3) нет необходимости задавать или рассчитывать полный компонентный состав исследуемого газа. Однако в данной работе это свойство уравнения (3) применяться не будет, так как исследуемые фреоны имеют строго определенный компонентный состав газа.

Также стоит отметить, что уравнение состояния газа (3) хорошо демонстрирует себя при расчете углеводородов и чистых газов в диапазоне давления не выше 30 МПа и при температурах не ниже 260 К.

Результаты

Для валидации результатов расчета уравнений состояния реального газа необходимо использовать экспериментальные данные по каждому из фреонов на исследуемом диапазоне температур.

Ниже, в табл. 1–3, предоставлены данные по линиям насыщенного пара для каждого из трех фреонов [8]. Рассчитаем данные параметры по уравнению Пенга–Робинсона и уравнению GERG-2008. Результаты расчета для фреона R404A сведем в табл. 4–7.

Отклонение расчётной величины от экспериментальной рассчитывалось по следующей формуле [20, 21]:

$$\delta = \frac{\gamma_{\text{расч.}} - \gamma_{\text{эксп.}}}{\gamma_{\text{эксп.}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где δ — значение отклонения рассчитанной величины от ее экспериментального значения, выраженное в процентах, $\gamma_{\text{расч.}}$ — значение рассчитанной величины, $\gamma_{\text{эксп.}}$ — экспериментальное значение величины.

Таким образом, для параметра «давление насыщенных паров» среднее отклонение величины давления от экспериментальных данных составляет 4,4 % для уравнения Пенга–Робинсона и 1,7 % для уравнения GERG-2008. Для фреона R408A эти величины 4 % и 2 % соответственно, для фреона R410A 0,65 % и 0,4 % соответственно.

Проведен расчет для параметра плотности газа. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таким образом, для параметра «плотность газа» среднее отклонение величины плотности от экспериментальных данных составляет 6,8 % для уравнения Пенга–Робинсона и 5,4 % для уравнения GERG-2008. Для фреона R408A эти величины 5,8 % и 5,4 %

Таблица 1. Параметры фреона R404A на линии насыщенного пара
Table 1. Parameters of R404A Freon on the saturated steam line

Температура, °С	Температура, К	Давление насыщения, 10 ⁵ Па	Плотность, кг/м ³	Удельная энтальпия, кДж/кг	Удельная энтропия, кДж/(кг·К)
-50	223	0,814	4,407	339,200	1,657
-45	228	1,038	5,532	342,400	1,651
-40	233	1,309	6,873	345,700	1,646
-35	238	1,632	8,457	348,900	1,642
-30	243	2,015	10,316	352,100	1,638
-25	248	2,463	12,484	355,300	1,635
-20	253	2,986	14,999	358,400	1,632
-15	258	3,590	17,902	361,400	1,630
-10	263	4,283	21,242	364,400	1,628
-5	268	5,074	25,070	367,400	1,626
0	273	5,970	29,447	370,200	1,624
5	278	6,982	34,443	372,900	1,622
10	283	8,118	40,141	375,500	1,621
15	288	9,387	46,637	378,000	1,619
20	293	10,800	54,048	380,300	1,617
25	298	12,366	62,517	382,400	1,615
30	303	14,096	72,226	384,300	1,613
35	308	16,000	83,404	385,900	1,610
40	313	18,090	96,357	387,200	1,607
45	318	20,377	111,504	388,000	1,603
50	323	22,875	129,450	388,400	1,597

Таблица 2. Параметры фреона R408A на линии насыщенного пара
Table 2. Parameters of R408A Freon on the saturated steam line

Температура, °С	Температура, К	Давление насыщения, 10 ⁵ Па	Плотность, кг/м ³	Удельная энтальпия, кДж/кг	Удельная энтропия, кДж/(кг·К)
-50	223	0,748	3,598	369,500	1,790
-45	228	0,955	4,513	372,500	1,781
-40	233	1,204	5,602	375,500	1,772
-35	238	1,502	6,887	378,400	1,764
-30	243	1,854	8,393	381,300	1,757
-25	248	2,268	10,147	384,200	1,751
-20	253	2,751	12,178	387,000	1,745
-15	258	3,309	14,519	389,800	1,739
-10	263	3,951	17,204	392,500	1,734
-5	268	4,684	20,274	395,200	1,729
0	273	5,517	23,773	397,700	1,725
5	278	6,457	27,753	400,200	1,720
10	283	7,515	32,270	402,500	1,716
15	288	8,698	37,393	404,700	1,712
20	293	10,016	43,201	406,800	1,708
25	298	11,479	49,786	408,700	1,703
30	303	13,097	57,264	410,400	1,699
35	308	14,880	65,774	411,800	1,694
40	313	16,838	75,491	413,000	1,689
45	318	18,984	86,644	413,900	1,683
50	323	21,327	99,534	414,400	1,677

Таблица 3. Параметры фреона R410A на линии насыщенного пара
Table 3. Parameters of R410A Freon on the saturated steam line

Температура, °C	Температура, К	Давление насыщения, 10 ⁵ Па	Плотность, кг/м ³	Удельная энтальпия, кДж/кг	Удельная энтропия, кДж/(кг·К)
-50	223	1,122	4,526	401,500	1,936
-45	228	1,415	5,616	404,600	1,924
-40	233	1,767	6,909	407,500	1,913
-35	238	2,187	8,435	410,500	1,902
-30	243	2,683	10,224	413,300	1,891
-25	248	3,265	12,312	416,100	1,882
-20	253	3,944	14,738	418,800	1,872
-15	258	4,730	17,546	421,300	1,863
-10	263	5,635	20,785	423,800	1,854
-5	268	6,670	24,511	426,100	1,846
0	273	7,849	28,790	428,300	1,837
5	278	9,184	33,696	430,200	1,829
10	283	10,688	39,317	432,000	1,821
15	288	12,375	45,759	433,600	1,812
20	293	14,260	53,149	434,800	1,803
25	298	16,357	61,643	435,800	1,794
30	303	18,681	71,440	436,400	1,785
35	308	21,247	82,798	436,600	1,774
40	313	24,070	96,062	436,200	1,763
45	318	27,165	111,722	435,200	1,750
50	323	30,549	130,504	433,400	1,736

Таблица 4. Расчет давления насыщенных паров для фреона R404A
Table 4. Calculation of R404A Freon saturated vapor pressure

Температура, °C	Температура, К	Давление насыщения, 10 ⁵ Па				
		Экспериментальные данные	Расчет по Пенгу – Робинсону	Отклонение, %	Расчет по GERG-2008	Отклонение, %
-50	223	0,814	0,869	6,756	0,836	2,713
-45	228	1,038	1,105	6,445	1,066	2,736
-40	233	1,309	1,389	6,081	1,344	2,659
-35	238	1,632	1,727	5,790	1,675	2,604
-30	243	2,015	2,125	5,474	2,065	2,486
-25	248	2,463	2,592	5,242	2,523	2,416
-20	253	2,986	3,134	4,963	3,054	2,271
-15	258	3,590	3,759	4,719	3,667	2,136
-10	263	4,283	4,476	4,502	4,369	2,001
-5	268	5,074	5,292	4,292	5,168	1,855
0	273	5,970	6,216	4,121	6,073	1,727
5	278	6,982	7,257	3,944	7,092	1,580
10	283	8,118	8,425	3,785	8,235	1,438
15	288	9,387	9,729	3,647	9,510	1,307
20	293	10,800	11,179	3,509	10,927	1,176
25	298	12,366	12,785	3,388	12,496	1,051
30	303	14,096	14,559	3,285	14,229	0,944
35	308	16,000	16,509	3,181	16,135	0,844
40	313	18,090	18,649	3,090	18,228	0,763
45	318	20,377	20,990	3,008	20,521	0,707
50	323	22,875	23,543	2,920	23,028	0,669

Таблица 5. Расчет плотности для фреона R404A
Table 5. Calculation of the R404A Freon density

Температура, °C	Температура, К	Плотность, кг/м ³				
		Экспериментальные данные	Расчет по Пенгу – Робинсону	Отклонение, %	Расчет по GERG-2008	Отклонение, %
-50	223	4,407	4,737	7,481	4,586	4,066
-45	228	5,532	5,932	7,231	5,769	4,286
-40	233	6,873	7,353	6,990	7,179	4,457
-35	238	8,457	9,031	6,784	8,847	4,610
-30	243	10,316	10,997	6,601	10,805	4,740
-25	248	12,484	13,288	6,440	13,089	4,846
-20	253	14,999	15,946	6,314	15,739	4,934
-15	258	17,902	19,015	6,217	18,800	5,016
-10	263	21,242	22,547	6,143	22,322	5,084
-5	268	25,070	26,600	6,103	26,362	5,154
0	273	29,447	31,243	6,099	30,985	5,223
5	278	34,443	36,556	6,135	36,267	5,296
10	283	40,141	42,631	6,203	42,300	5,379
15	288	46,637	49,583	6,317	49,192	5,478
20	293	54,048	57,550	6,479	57,076	5,602
25	298	62,517	66,703	6,696	66,116	5,757
30	303	72,226	77,263	6,974	76,524	5,951
35	308	83,404	89,514	7,326	88,575	6,200
40	313	96,357	103,850	7,776	102,650	6,531
45	318	111,504	120,810	8,346	119,280	6,974
50	323	129,450	141,210	9,085	139,270	7,586

Таблица 6. Расчет удельной энтальпии газа для фреона R404A
Table 6. Calculation of the gas specific enthalpy for R404A Freon

Температура, °C	Температура, К	Удельная энтальпия, кДж/кг				
		Экспериментальные данные	Расчет по Пенгу – Робинсону	Отклонение, %	Расчет по GERG-2008	Отклонение, %
-50	223	339,200	336,020	-0,938	336,620	-0,761
-45	228	342,400	339,210	-0,932	339,550	-0,832
-40	233	345,700	342,390	-0,957	342,470	-0,934
-35	238	348,900	345,550	-0,960	345,370	-1,012
-30	243	352,100	348,690	-0,968	348,250	-1,093
-25	248	355,300	351,790	-0,988	351,090	-1,185
-20	253	358,400	354,840	-0,993	353,880	-1,261
-15	258	361,400	357,840	-0,985	356,630	-1,320
-10	263	364,400	360,770	-0,996	359,310	-1,397
-5	268	367,400	363,620	-1,029	361,930	-1,489
0	273	370,200	366,380	-1,032	364,450	-1,553
5	278	372,900	369,040	-1,035	366,890	-1,612
10	283	375,500	371,570	-1,047	369,200	-1,678
15	288	378,000	373,950	-1,071	371,380	-1,751
20	293	380,300	376,170	-1,086	373,400	-1,814
25	298	382,400	378,190	-1,101	375,240	-1,872
30	303	384,300	379,970	-1,127	376,850	-1,939
35	308	385,900	381,470	-1,148	378,200	-1,995
40	313	387,200	382,630	-1,180	379,220	-2,061
45	318	388,000	383,360	-1,196	379,840	-2,103
50	323	388,400	383,530	-1,254	379,930	-2,181

Таблица 7. Расчет удельной энтропии газа для фреона R404A
Table 7. Calculation of the gas specific entropy for R404A Freon

Температура, °С	Температура, К	Удельная энтальпия, кДж/кг				
		Экспериментальные данные	Расчет по Пенгу – Робинсону	Отклонение, %	Расчет по GERG-2008	Отклонение, %
-50	223	1,657	1,704	2,830	1,639	-1,104
-45	228	1,651	1,699	2,877	1,632	-1,145
-40	233	1,646	1,694	2,910	1,626	-1,191
-35	238	1,642	1,690	2,917	1,621	-1,261
-30	243	1,638	1,686	2,955	1,617	-1,288
-25	248	1,635	1,684	2,966	1,613	-1,346
-20	253	1,632	1,681	3,002	1,610	-1,373
-15	258	1,630	1,679	2,994	1,607	-1,436
-10	263	1,628	1,677	3,004	1,604	-1,474
-5	268	1,626	1,675	3,032	1,602	-1,501
0	273	1,624	1,674	3,067	1,599	-1,515
5	278	1,622	1,672	3,107	1,597	-1,517
10	283	1,621	1,671	3,085	1,595	-1,579
15	288	1,619	1,670	3,125	1,593	-1,581
20	293	1,617	1,668	3,154	1,591	-1,589
25	298	1,615	1,666	3,176	1,589	-1,610
30	303	1,613	1,664	3,168	1,586	-1,649
35	308	1,610	1,662	3,199	1,583	-1,652
40	313	1,607	1,658	3,192	1,580	-1,693
45	318	1,603	1,654	3,194	1,575	-1,728
50	323	1,597	1,649	3,244	1,570	-1,709

соответственно, для фреона R410A — 0,025 % и 2,7 % соответственно.

Далее повторим те же действия для параметра удельная энтальпия газа. Результаты расчета приведены в табл. 6.

Таким образом, для параметра удельная энтальпия газа среднее отклонение величины энтальпии от экспериментальных данных составляет -1 % для уравнения Пенга – Робинсона и -1,5 % для уравнения GERG-2008. Для фреона R408A эти величины 0,9 % и -1,9 % соответственно, для фреона R410A 2 % и -0,5 % соответственно.

Далее повторим те же действия для параметра удельная энтропия газа. Результаты расчета приведены в табл. 7.

Таким образом, для параметра удельная энтропия газа среднее отклонение величины энтропии от экспериментальных данных составляет 3 % для уравнения Пенга – Робинсона и -1,5% для уравнения GERG-2008. Для фреона R408A эти величины 4 % и -1,5 % соответственно, для фреона R410A 5,2 % и -0,5 % соответственно.

Для наглядности представим графики зависимости каждой из четырех рассчитанных величин от температуры для фреона R404, данные для построения графиков получены из расчёта фреона по уравнениям состояния реального газа и исходя из экспериментальных данных. Графики представлены ниже. На рис. 1 представлена зависимость давления насыщенных паров от температуры фреона, на рис. 2 представлена зависимость плотности фреона от температуры, на рис. 3 представлена зависимость удельной энтальпии от температуры

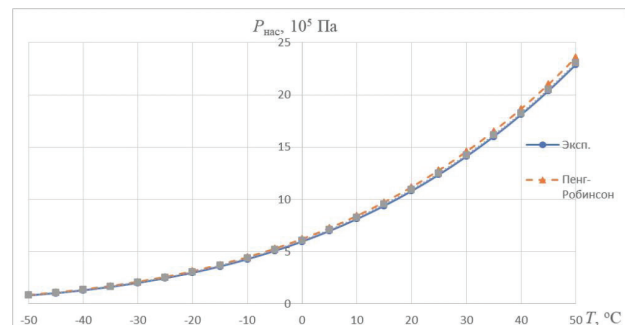


Рис. 1. График зависимости давления насыщения $P_{нас}$ от температуры фреона T для фреона R404A
Fig. 1. Plot of saturation pressure P_{sat} versus Freon temperature T for Freon R404A

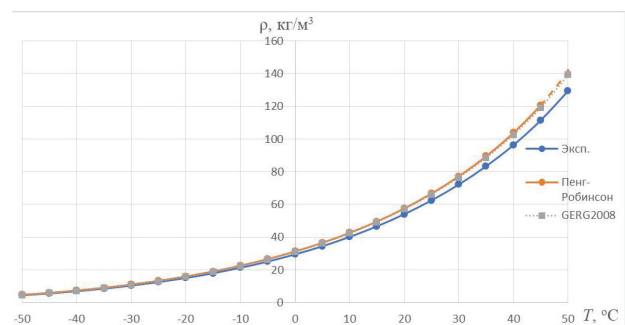


Рис. 2. График зависимости плотности фреона ρ от температуры T для фреона R404A
Fig. 2. Plot of Freon density ρ versus Freon temperature T

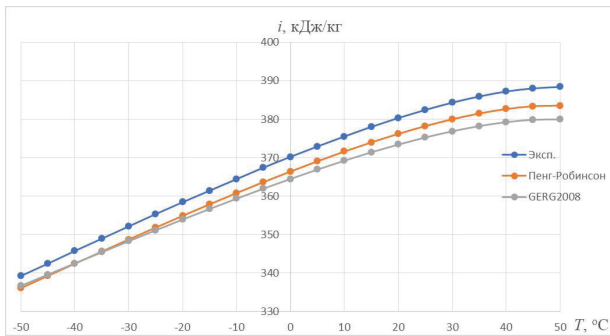


Рис. 3. График зависимости удельной энтальпии фреона i от температуры T для фреона R404A
Fig. 3. Plot of Freon specific enthalpy i versus Freon temperature T

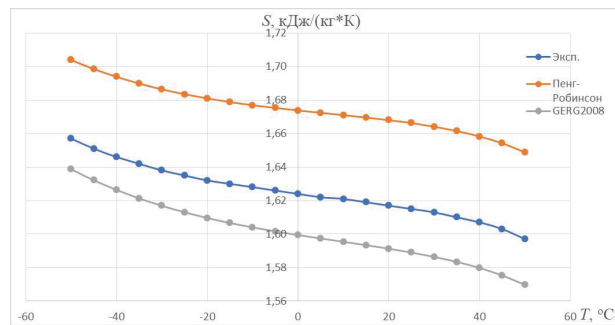


Рис. 4. График зависимости удельной энтропии фреона S от температуры T для фреона R404A
Fig. 4. Plot of Freon specific entropy S versus Freon temperature T

Таблица 8. Сводная таблица данных по среднему отклонению расчета
Table 8. Summary table of data on the average calculation deviation

Фреон	Параметр	Уравнение Пенга – Робинсона	Уравнение GERG-2008
R404A	Давление насыщения	4,39	1,72
	Плотность газа	6,84	5,39
	Удельная энтальпия	-1,05	-1,52
	Удельная энтропия	3,06	-1,47
R408A	Давление насыщения	4,02	2,08
	Плотность газа	5,88	5,38
	Удельная энтальпия	-0,86	-1,88
	Удельная энтропия	3,98	-1,45
R410A	Давление насыщения	0,63	0,38
	Плотность газа	-0,03	2,72
	Удельная энтальпия	1,96	-0,45
	Удельная энтропия	5,24	-0,46
	Среднее значение	2,84	0,87

фреона, на рис. 4 представлена зависимость удельной энтропии от температуры фреона.

Сведем данные, полученные при расчете погрешности уравнений состояния реального газа Пенга – Робинсона и GERG-2008 для фреонов R404A, R408A и R410A, в единую таблицу. В табл. 8 представлена сводная таблица данных по средним значениям отклонения расчетов от экспериментальных значений.

Обсуждение полученных результатов

Исходя из полученных в ходе работы данных, можно выделить несколько полезных для практики результатов.

Рассмотренные уравнения расчета свойств реального фреона, несмотря на наличие некоторых отклонений от эксперимента, могут использоваться для расчетов холодильных машин с учетом инженерного запаса по рассчитываемым параметрам 10 % и выше. Стоит учесть, что для холодильных машин и агрегатов, где необходимо достижение высокой точности, при погрешностях расчета ниже 2 %, ни один из вышеуказанных методов не подходит. Для обеспечения высокой точности для каждого хладагента разрабатываются индивидуальные уравнения состояния.

Метод GERG-2008, по сравнению с уравнением Пенга – Робинсона, имеет ниже среднюю погрешность расчета практически по всем показателям и для рассмотренных газов, что говорит о его более высокой эффективности для подобных расчетов.

Также стоит отметить то, что для фреона R410A точность всех расчетов была значительно выше, чем для двух других, а следовательно, данные этой работы нельзя экстраполировать на все существующие фреоны и для каждого отдельного вещества необходимо проводить отдельный эксперимент.

Заключение

В данной работе была проведена верификация уравнений состояния реального газа Пенга – Робинсона и GERG-2008 для трех различных хладагентов. Были получены расчетные данные и проведено сравнение величины четырех различных параметров газов, полученных расчетным методом, с экспериментальными значениями для каждого фреона. Рассчитаны показатели отклонения величин по всем приведенным расчетам, а также средние показатели для каждого газа и параметра и для метода в целом. Сформулированы выводы и рекомендации по использованию методов расчета реального фреона.

1. Aksenov A., Kozhukhov Y., Sokolov M., Simonov A. Analysis and modernization of real gas thermodynamic calculation for turbocompressors and detander units // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018). 2018. Vol. 245. 09005. DOI: 10.1051/mateconf/201824509005.

2. Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Neverov V. V., Maiev K. G., Mironov Yu. R. The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876 (1). 020046. DOI: 10.1063/1.4998866.

3. Яблоков А. М., Кожухов Ю. В., Садовский Н. И. Численное исследование влияния эквивалентной песочной шероховатости рабочего колеса на характеристики малорасходной ступени центробежного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-3-11.

4. Boncinelli P., Rubecchini F., Arnone A. [et al.]. Real Gas Effects in Turbomachinery Flows: A CFD Model for Fast Computations // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Volume 6: Turbo Expo 2003, Parts A and B. Atlanta, Georgia, USA. June 16–19, 2003. P. 1103–1112. DOI: 10.1115/GT2003-38101.

5. Григорьев Б. А., Сокотущенко В. Н., Александров И. С. Особенности фазового поведения углеводородных смесей с низким конденсатным фактором // Вести газовой науки: научно-технический сборник. 2018. № 4 (36). С. 225–236.

6. Ваяншиов А. Д., Карабанова В. В., Сорокин М. А. Технико-экономическое обоснование замены СПЧ на Сеноманских ДКС Уренгойского месторождения // Компрессорные технологии. 2019. № 1. С. 30–33.

7. Брусиловский А. И. Фазовые превращения при разработке нефти и газа. Москва: Грааль, 2002. 575 с. ISBN 5-94688-031-4.

8. Баренбойм А. Б. Малорасходные фреоновые турбокомпрессоры. Москва: Машиностроение, 1974. 224 с.

9. Baltadjev N., Lettieri C., Spakovszky Z. An Investigation of Real Gas Effects in Supercritical CO₂ Centrifugal Compressors // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 3B: Oil and Gas Applications; Organic Rankine Cycle Power Systems; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Dusseldorf, Germany. June 16–20, 2014. V03BT36A011. DOI: 10.1115/GT2014-26180.

10. Roytta P., Honkatukia J., Turunen-Saaresti T. Centrifugal Compressor Working Fluids for Refrigeration Cycle // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Volume 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. Orlando, Florida, USA. June 8–12, 2009. P. 89–97. DOI: 10.1115/GT2009-59150.

11. Васин О. Е., Минигулов Р. М., Боднарук В. В. [и др.]. Кинематические схемы компрессоров хладагента установок по производству СПГ // Компрессорные технологии. 2019. № 1. С. 8–11.

12. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей / пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Химия: Ленингр. отд-ние, 1982. 592 с.

13. Moraga F., Hofer D., Saxena S. [et al.]. Numerical Approach for Real Gas Simulations: Part I — Tabular Fluid Properties for Real Gas Analysis // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T38A004. DOI: 10.1115/GT2017-63148.

14. Saxena S., Mallina R., Moraga F. [et al.]. Numerical Approach for Real Gas Simulations: Part II — Flow Simulation for Supercritical CO₂ Centrifugal Compressor // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical

CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T38A005. DOI: 10.1115/GT2017-63149.

15. Taher M. ASME PTC-10 and Heat Capacity Relations for Polytropic and Isentropic Compression Process of Real Gas // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T27A005. DOI: 10.1115/GT2017-63106.

16. Hanimann L., Mangani L., Casartelli E. [et al.]. Real Gas Models in Coupled Algorithms Numerical Recipes and Thermophysical Relations // International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2020. Vol. 5 (3). 20. DOI: 10.3390/ijtp5030020.

17. ISO 12213-2:2006. Natural gas calculation of compression factor. Part 2: Calculation using a molar composition analysis // ISO/TC 193/SC 1 Analysis of natural gas. 2006. 32 p.

18. Sokolov M., Sadovsky N., Zuev A., Gileva L., Nguyen M. H. Real gas state equations comparative analysis for low-temperature calculations // 2019 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE 2019). 2019. 05007. DOI: 10.1051/e3sconf/201914005007.

19. Новикова О. В., Тюменков Г. Ю. Анализ приведенных модификаций уравнения состояния Пенга–Робинсона в рамках процесса Джоуля–Томсона // Проблемы физики, математики и техники. 2013. № 3 (16). С. 30–33.

20. Aksenov A., Kozhukhov Y., Sokolov M., Simonov A. Analysis and modernization of real gas thermodynamic calculation for turbocompressors and detander units // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. 2018. Vol. 245. 09005. DOI: 10.1051/mateconf/201824509005.

21. Sadovskiy N., Strizhak L., Simonov A., Sokolov M. Some problem of centrifugal compressors upgrading // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. 2018. Vol. 245. 09004. DOI: 10.1051/mateconf/201824509004.

22. Peng D. Y., Robinson D. B. A new two-constant equation of state // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59–64.

СОКОЛОВ Михаил Игоревич, ассистент, аспирант Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики.

SPIN-код: 9412-9251

AuthorID (РИНЦ): 1021564

Адрес для переписки: smi1994spb@gmail.com

КОЖУХОВ Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики, ведущий инженер Центра промышленной, ресурсно-инфраструктурной экспертизы и управления.

SPIN-код: 5756-4994

AuthorID (РИНЦ): 536513

ORCID: 0000-0001-7679-9419

AuthorID (SCOPUS): 56829504700

ResearcherID: N-9066-2016

Адрес для переписки: kozhukhov_yv@mail.ru

Для цитирования

Соколов М. И., Кожухов Ю. В. Исследование применимости уравнений Пенга–Робинсона и GERG-2008 состояния реального газа для расчета свойств фреонов для холодильных машин и компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 34–43. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-34-43.

Статья поступила в редакцию 15.02.2021 г.

© М. И. Соколов, Ю. В. Кожухов

INVESTIGATION OF APPLICABILITY OF PENG–ROBINSON AND GERG-2008 EQUATIONS OF STATE OF REAL GAS FOR CALCULATING PROPERTIES OF FREONS FOR REFRIGERATION MACHINES AND COMPRESSORS

M. I. Sokolov, Yu. V. Kozhukhov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, 195251

A study of real gas state equations Peng–Robinson and GERG-2008 with respect to calculation of Freons R404A, R408A and R410A has been carried out. Four Freon parameters are calculated during the study: saturated vapor pressure at the saturation line at some Freon temperature, Freon density at saturation pressure and some temperature, enthalpy and entropy at the same pressures and temperature. The data obtained from the calculation of Freon by the above equations are compared with the experimental data for each of the above Freons. As a result of this work, data have been obtained to evaluate the accuracy of the Peng–Robinson and GERG-2008 equations of state for each of the three CFCs, to evaluate the effectiveness of these equations, and to provide recommendations for the calculation and application of these equations in the design and mathematical modelling of refrigeration machines.

Keywords: Freon, real gas, equation of state of real gas, thermodynamic calculation, refrigeration engineering, refrigeration compressor.

References

1. Aksenov A., Kozhukhov Y., Sokolov M., Simonov A. Analysis and modernization of real gas thermodynamic calculation for turbocompressors and detander units // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018). 2018. Vol. 245. 09005. DOI: 10.1051/mateconf/201824509005. (In Engl.).
2. Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Neverov V. V., Malev K. G., Mironov Yu. R. The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876 (1). 020046. DOI: 10.1063/1.4998866. (In Engl.).
3. Yablokov A. M., Kozhukhov Yu. V., Sadovskiy N. I. Chislennoye issledovaniye vliyaniya ekvivalentnoy pesochnoy sherokhovatosti rabocheho koleasa na kharakteristiki malorashodnoy stupeni tsentrobezhnogo kompressora [The influence of the equivalent sand roughness of compressor impeller on the characteristics of centrifugal compressor low-emission stage a numerical analysis] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. Vol. 4. P. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-3-11. (In Russ.).
4. Boncinelli P., Rubecchini F., Arnone A. [et al.]. Real Gas Effects in Turbomachinery Flows: A CFD Model for Fast Computations // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Volume 6: Turbo Expo 2003, Parts A and B. Atlanta, Georgia, USA. June 16–19, 2003. P. 1103–1112. DOI: 10.1115/GT2003-38101. (In Engl.).
5. Grigor'yev B. A., Sokotushchenko V. N., Aleksandrov I. S. Osobennosti fazovogo povedeniya uglevodorodnykh smesey s nizkim kondensatnym faktorom [Specific phase behavior of hydrocarbon mixtures with low condensation factor] // Vesti gazovoy nauki: nauchno-tehnicheskiiy sbornik. *Vesti Gazovoy Nauki scientific-technical collection*. 2018. Vol. 4 (36). P. 225–236. (In Russ.).
6. Vanyashov A. D., Karabanova V. V., Sorokin M. A. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye zameny SPCh na Senomanskikh DKS Urengoyetskogo mestorozhdeniya [Feasibility study for replacing the HRC at the Cenomanian booster compressor stations of the Urengoy field] // *Kompressornyye tekhnologii*. 2019. No. 1. P. 30–33. (In Russ.).
7. Brusilovskiy A. I. Fazovyye prevrashcheniya pri razrabotke nefi i gaza [Phase transformations in oil and gas development]. Moscow: Graal' Publ., 2002. 575 p. ISBN 5-94688-031-4. (In Russ.).
8. Barenboym A. B. Malorashodnyye freonovyye turbokompressory [Low consumption freon turbochargers]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1974. 224 p. (In Russ.).
9. Baltadjiev N., Lettieri C., Spakovszky Z. An Investigation of Real Gas Effects in Supercritical CO₂ Centrifugal Compressors // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 3B: Oil and Gas Applications; Organic Rankine Cycle Power Systems; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Düsseldorf, Germany. June 16–20, 2014. V03BT36A011. DOI: 10.1115/GT2014-26180. (In Engl.).
10. Roytta P., Honkatukia J., Turunen-Saaresti T. Centrifugal Compressor Working Fluids for Refrigeration Cycle // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Volume 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. Orlando, Florida, USA. June 8–12, 2009. P. 89–97. DOI: 10.1115/GT2009-59150. (In Engl.).
11. Vasin O. E., Minigulov R. M., Bodnaruk V. V. [et al.]. Kinematicheskiye skhemy kompressorov khladagenta ustanovok po proizvodstvu SPG [Kinematic diagrams of refrigerant compressors for LNG plants] // *Kompressornyye tekhnologii*. 2019. No. 1. P. 8–11. (In Russ.).
12. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. Svoystva gazov i zhidkostey [Properties of gases and liquids] / Trans. from English B. I. Sokolova. 3rd ed. Leningrad: Khimiya, 1982. 592 p. (In Russ.).
13. Moraga F., Hofer D., Saxena S. [et al.]. Numerical Approach for Real Gas Simulations: Part I — Tabular Fluid Properties for Real Gas Analysis // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017:

Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T38A004. DOI: 10.1115/GT2017-63148. (In Engl.).

14. Saxena S., Mallina R., Moraga F. [et al.]. Numerical Approach for Real Gas Simulations: Part II — Flow Simulation for Supercritical CO₂ Centrifugal Compressor // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T38A005. DOI: 10.1115/GT2017-63149. (In Engl.).

15. Taher M. ASME PTC-10 and Heat Capacity Relations for Polytropic and Isentropic Compression Process of Real Gas // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V009T27A005. DOI: 10.1115/GT2017-63106. (In Engl.).

16. Hanimann L., Mangani L., Casartelli E. [et al.]. Real Gas Models in Coupled Algorithms Numerical Recipes and Thermophysical Relations // International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2020. Vol. 5 (3). 20. DOI: 10.3390/ijtp5030020. (In Engl.).

17. ISO 12213-2:2006. Natural gas calculation of compression factor. Part 2: Calculation using a molar composition analysis // ISO/TC 193/SC 1 Analysis of natural gas. 2006. 32 p. (In Engl.).

18. Sokolov M., Sadovsky N., Zuev A., Gileva L., Nguyen M. H. Real gas state equations comparative analysis for low-temperature calculations // 2019 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE 2019). 2019. 05007. DOI: 10.1051/e3sconf/201914005007. (In Engl.).

19. Novikova O. V., Tyumenkov G. Yu. Analiz privedennykh modifikatsiy uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona v ramkakh protsessa Dzhoulia-Tomsona [Analysis of the reduced modifications of the Peng–Robinson equation of state in the framework of the Joule–Tomson process] // Problemy fiziki, matematiki i tekhniki. Problems of physics, mathematics and technics. 2013. Vol. 3 (16). P. 30–33. (In Russ.).

20. Aksenov A., Kozhukhov Y., Sokolov M., Simonov A. Analysis and modernization of real gas thermodynamic calculation for turbocompressors and detander units //

International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. 2018. Vol. 245. 09005. DOI: 10.1051/mateconf/201824509005. (In Engl.).

21. Sadovskiy N., Strizhak L., Simonov A., Sokolov M. Some problem of centrifugal compressors upgrading // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. 2018. Vol. 245. 09004. DOI: 10.1051/mateconf/201824509004. (In Engl.).

22. Peng D. Y., Robinson D. B. A new two–constant equation of state // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59–64. (In Engl.).

SOKOLOV Mikhail Igorevich, Assistant, Graduate Student of Higher School of Power Engineering, Institute of Energy.

SPIN-code: 9412-9251

AuthorID (RSCI): 1021564

Address for correspondence: smi1994spb@gmail.com

KOZHUKHOV Yuriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Leading Engineer of Center for Industrial, Resource and Infrastructure Expertise and Management.

SPIN-code: 5756-4994

AuthorID (RSCI): 536513

ORCID: 0000-0001-7679-9419

AuthorID (SCOPUS): 56829504700

ResearcherID: N-9066-2016

Address for correspondence: kozhukhov_yv@mail.ru

For citations

Sokolov M. I., Kozhukhov Yu. V. Investigation of applicability of Peng–Robinson and GERG-2008 equations of state of real gas for calculating properties of Freons for refrigeration machines and compressors // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 34–43. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-34-43.

Received February 15, 2021.

© M. I. Sokolov, Yu. V. Kozhukhov