

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ ВАЖНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ. НОРМАЛЬНЫЙ НОНАН

И.С. Александров, А.А. Герасимов

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1
E-mail: alexandrov_kgrd@mail.ru

Выполнен анализ современных фундаментальных уравнений состояния для технически важных рабочих веществ. На основе надежных экспериментальных данных разработано фундаментальное уравнение состояния для нормального нонана (н-нонана) как представителя технически важных органических рабочих веществ. Уравнение описывает экспериментальные данные с погрешностью, близкой к погрешности эксперимента, и позволяет рассчитывать с высокой точностью все термодинамические свойства н-нонана в диапазоне температуры от тройной точки до начала термической деструкции при давлениях до 100 МПа. Средняя погрешность описания плотности составляет 0,1-0,3, давления насыщенного пара – 0,2-0,8, изобарной теплоемкости – 0,6-0,8, скорости звука – 0,2-0,3 %.

нормальные алканы, н-нонан, плотность, температура, теплоемкость, скорость звука

ВВЕДЕНИЕ

Расчет теплоэнергетического оборудования сопряжен с использованием данных о термодинамических свойствах рабочих веществ. Такие данные определяют, как правило, по фундаментальным уравнениям состояния (УС). Под ними понимают уравнения состояния, описывающие один из термодинамических потенциалов в собственных переменных и позволяющие с высокой точностью определять все термодинамические свойства (ТДС) в широком диапазоне температуры и давления, включая область фазовых переходов. В настоящее время разработаны фундаментальные УС для большой группы технически важных веществ. Традиционно уравнения сначала были получены для технически важных газов, легких углеводородов и фреонов, для которых имелись обширные, разнородные и надежные экспериментальные данные. При этом параллельно решались задачи оптимизации формы и минимизации функционала отклонений для определения коэффициентов УС. Весьма подробно результаты этой многолетней работы изложены в монографии Р. Спана [1]. Там же предлагается и оптимальная форма 12-константного уравнения для технически важных веществ. Распространение этой формы уравнения на достаточно «тяжелые» углеводороды, которые широко используются в самых различных технологических процессах и производствах, требует проверки. Решению проблемы разработки надежных УС технически важных рабочих веществ и посвящена данная работа. Все дальнейшие расчеты продемонстрированы на примере н-нонана (н-С₉Н₂₀).

Нормальный нонан, являясь представителем гомологического ряда н-алканов, относится к технически важным углеводородам, для которых необхо-

димы надежные данные о термодинамических свойствах в широком диапазоне параметров состояния. Данные используются при расчете тепло-массообменного оборудования, транспортных систем, энергетических установок. Фундаментальное УС для $n\text{-C}_9\text{H}_{20}$ необходимо также при моделировании фазового поведения сложных углеводородных систем в технологических и пластовых условиях.

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ $n\text{-NONANA}$

Наиболее широко в настоящее время при построении фундаментальных УС используют зависимость свободной энергии Гельмгольца $a(\rho, T)$ от плотности ρ и температуры T . Уравнение представляют в виде

$$a(\rho, T) = a^0(\rho, T) + a^r(\rho, T), \quad (1)$$

где $a(\rho, T)$ – молярная свободная энергия Гельмгольца; $a^0(\rho, T)$ – идеально-газовая часть свободной энергии Гельмгольца; $a^r(\rho, T)$ – избыточная часть свободной энергии Гельмгольца. При построении уравнений и проведении термодинамических расчетов принято использовать безразмерную форму уравнения (1), которая будет иметь следующий вид:

$$\frac{a(\rho, T)}{RT} = \frac{a^0(\rho, T) + a^r(\rho, T)}{RT} = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau), \quad (2)$$

где $\delta = \rho/\rho_c$; $\tau = T/T_c$; ρ_c, T_c – параметры приведения, в качестве которых, как правило, принимают критические значения (для $n\text{-nonana}$ $\rho_c = 1,81$ кмоль/м³ и $T_c = 594,55$ К).

Безразмерная идеально-газовая часть свободной энергии Гельмгольца определяется по соотношению

$$\alpha^0(\tau, \delta) = \frac{h_0^0 \tau}{RT_c} - \frac{s_0^0}{R} - 1 + \ln \frac{\delta \tau_0}{\delta_0 \tau} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau^2} d\tau + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau} d\tau, \quad (3)$$

где $\delta_0 = \rho_0/\rho_c$; $\tau_0 = T_c/T_0$; ρ_0 – плотность идеального газа при температуре T_0 и давлении p_0 ; T_0, p_0 – вспомогательная опорная точка ($T_0 = 298,15$ К; $p_0 = 101325$ Па); h_0^0, s_0^0 – соответственно энтальпия и энтропия в идеально-газовом состоянии при температуре T_0 . За термодинамическое начало отсчета принято состояние равновесного молекулярного кристалла при температуре $T = 0$ К.

Для расчета идеально-газовой части по уравнению (3) необходимы данные об изобарной теплоемкости в состоянии идеального газа c_p^0 . Для определения термодинамических свойств рассматриваемых углеводородов в идеально-газовом состоянии использовалась теоретически обоснованная форма уравнения для идеально-газовой изобарной теплоемкости в виде

$$\frac{c_p^0}{R} = c_0 + c_1 T^{c_2} + \sum_{k=1}^4 v_k \left(\frac{u_k}{T} \right)^2 \frac{\exp(u_k/T)}{[\exp(u_k/T) - 1]^2}, \quad (4)$$

где $R = 8,314472$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

Термодинамическое соотношение (3) совместно с зависимостью (4) приводит к следующей формуле для расчета α^0 :

$$\alpha^0 = a_1 + a_2\tau + \ln\delta + (c_0 - 1)\ln\tau - \frac{c_1 T_c^{c_2}}{c_2(c_2 - 1)}\tau^{-c_2} + \sum_{k=1}^4 v_k \ln[1 - \exp(-u_k\tau/T_c)]. \quad (5)$$

Значения коэффициентов для расчета c_p^0 по формуле (4) приняты по [2]. Коэффициенты уравнений (4) и (5) представлены в табл. 1 (коэффициенты c_1 и c_2 для н-нонана равны нулю).

Таблица 1. Значения коэффициентов уравнений (4) и (5) для идеально-газовых функций

Table 1. Coefficients of equations (4) and (5) for ideal-gas functions

c_0	17,349	u_0	-
v_1	24,926	u_1	1221,0
v_2	24,842	u_2	2244,0
v_3	11,188	u_3	5008,0
v_4	17,483	u_4	11724,0
a_1	-49,799	a_2	13,383

Избыточная часть свободной энергии Гельмгольца, как правило, описывается рядом по плотности и температуре, который включает полиномиальные и экспоненциальные члены. В работе Е. Леммона и Р. Спана [3] для н-нонана предлагается 12- константное УС, включающее полиномиальные и экспоненциальные члены. Форма УС применяется для описания свойств неполярных веществ и имеет вид

$$\alpha^r(\delta, \tau) = n_1\delta\tau^{0,25} + n_2\delta\tau^{1,125} + n_3\delta\tau^{1,5} + n_4\delta^2\tau^{1,375} + n_5\delta^3\tau^{0,25} + n_6\delta^7\tau^{0,875} + n_7\delta^2\tau^{0,625}\exp(-\delta) + n_8\delta^5\tau^{1,75}\exp(-\delta) + n_9\delta\tau^{3,625}\exp(-\delta^2) + n_{10}\delta^4\tau^{0,625}\exp(-\delta^2) + n_{11}\delta^3\tau^{14,5}\exp(-\delta^3) + n_{12}\delta^4\tau^{12,0}\exp(-\delta^3) \quad (6)$$

Однако форма уравнения изменяется при переходе от неполярных веществ к полярным. По нашему мнению, это может вызвать определенные затруднения (ограничения) при использовании УС для расчета свойств смесей. Поэтому альтернативным подходом можно рассматривать 14- константное УС, разработанное Л. Саном и Дж. Эйли [4]. Форма УС применима как для полярных, так и для неполярных веществ и имеет вид

$$\alpha^r(\delta, \tau) = n_1\delta\tau^{0,25} + n_2\delta\tau^{1,25} + n_3\delta\tau^{1,5} + n_4\delta^3\tau^{0,25} + n_5\delta^7\tau^{0,875} + n_6\delta^2\tau^{1,375} + n_7\delta\exp(-\delta) + n_8\delta\tau^{2,375}\exp(-\delta) + n_9\delta^2\tau^{2,0}\exp(-\delta) + n_{10}\delta^5\tau^{2,125}\exp(-\delta) + n_{11}\delta\tau^{3,5}\exp(-\delta^2) + n_{12}\delta\tau^{6,5}\exp(-\delta^2) + n_{13}\delta^4\tau^{4,75}\exp(-\delta^2) + n_{14}\delta^2\tau^{12,5}\exp(-\delta^3) \quad (7)$$

В данной статье получены коэффициенты для уравнения в форме (7), которое в дальнейшем может быть использовано для практических расчетов. Коэффи-

коэффициенты уравнения (7) были определены по разнородным экспериментальным данным и представлены в табл. 2.

Поиск коэффициентов уравнения (7) осуществлялся с помощью одной из модификаций метода случайного поиска [5], который позволяет находить минимум оптимизируемого функционала при достаточно ограниченном наборе экспериментальных данных. А также этот метод позволяет накладывать ограничения на значения термодинамических величин, обеспечивающих «физическую» форму поверхности состояния: выполнение условий критической точки, правила Максвелла, положительности теплоемкостей, а также «правильного» знака других производных термодинамического потенциала.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (7) для н-нонана
Table 2. Coefficients of equation (7) for n-nonane

№ п/п	n_i	№ п/п	n_i
1	1,425989774875	8	-0,004396625631336
2	1,212510019879	9	0,5079410922854
3	-3,509890006347	10	-0,008429929111815
4	0,1159714278109	11	-0,5018289608261
5	0,0002785963606506	12	-0,007731610169910
6	-0,2457648159052	13	-0,1295643125895
7	0,0005119407843815	14	-0,007926516782634

АНАЛИЗ ДАННЫХ И СРАВНЕНИЕ ИХ С УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ

Термодинамические свойства нормального нонана изучены значительно менее подробно, чем более “легких” алканов. Наиболее широкодиапазонные и точные исследования – это исследования p, v, T - и C_p, p, T – зависимостей, выполненных в ОТФЛ ГНИ [11, 23], и C_p, v, T – зависимости – в институте физики [21]. Эти исследования составили основу обрабатываемого массива данных. Важно отметить, что широкодиапазонные экспериментальные данные [11, 23] не были учтены при разработке УС в форме (6) в [3]. Это позволяет сделать вывод о том, что полученное в данной работе УС в форме (7) является более экспериментально обоснованным, что подтверждается результатами сравнения, представленными в табл. 3.

Достаточно подробно исследована плотность жидкой фазы при высоких давлениях (до 200 МПа), при температурах, не превышающих нормальную точку кипения.



Рис. 1. Сравнение значений плотности жидкой фазы, рассчитанных по УС (7)
Fig. 1. Comparisons of the values of the liquid phase densities calculated from Eq. 7

Плотность газовой фазы, критическая и сверхкритическая области исследованы только в работе [11]. Как видно из табл. 3 и рис. 1, плотность жидкой фазы описывается с погрешностью 0,1 – 0,3 %. Несколько большее значение средней погрешности для данных Д. Курумова [11] объясняется возрастающими отклонениями вблизи пограничной кривой при температурах, превышающих 493 К. Плотность газовой фазы описывается с погрешностью 0,3 – 0,8 %, возрастаая до 1,5 % вблизи линии насыщения при высоких температурах.

Надежные данные о давлении насыщенных паров имеются только в диапазоне температуры 323 – 423 К [13, 14], и они описываются в среднем с отклонением 0,1 %. В низкотемпературной области известны экспериментальные данные Г. Карруч и Р. Кобаяши [15]. Точность данных [15] невысока, отклонения превышают 15 %. В то же время расчетные данные авторов [17] описываются с погрешностью, не превышающей 1,5 %. При высоких температурах в диапазоне 473 – 583 К единственные данные Д. Курумова [11] завышены на 1,5 – 3,0 %, но при приближении к критической температуре отклонения уменьшаются до 0,1 – 0,4 %.

Плотность насыщенной жидкой фазы передается с погрешностью, не превышающей 0,1 %, до температуры 473 К и далее возрастает до 0,2 – 0,4 % по мере приближения к критической точке, что видно из рис. 2. Плотность насыщенной газовой фазы при температурах выше 500 К описывается с погрешностью 1,5 – 3,0 %, а при более низких температурах погрешность близка к погрешности описания давления насыщенных паров.

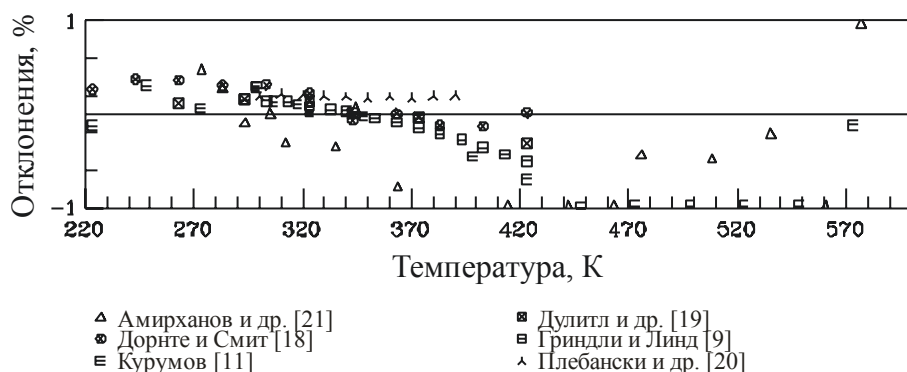


Рис. 2. Сравнение значений плотности насыщенной жидкой фазы, рассчитанных по УС (7)

Fig. 2. Comparisons of the values of the saturated liquid densities calculated from Eq. 7

Данные разных авторов об изобарной теплоемкости жидкой фазы описываются со средней погрешностью 0,5 – 0,6 % (рис. 3). Единственные данные Герасимова [23] в газовой фазе описываются со сравнительно высокой погрешностью только из-за того, что практически все экспериментальные точки получены вблизи пограничной кривой. В сверхкритической области средняя погрешность описания данных [23] составила 0,6 %. Данные Амирханова с сотрудниками [21] о C_p описываются в разных областях со средней погрешностью 1–2 %, что соответствует их точности.

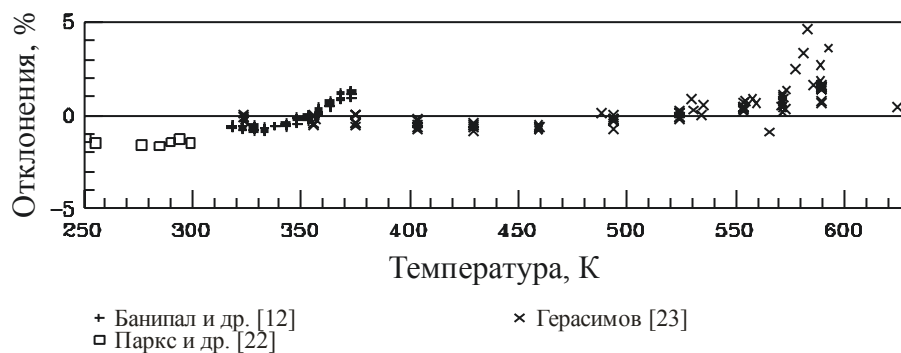


Рис. 3. Сравнение значений изобарной теплоемкости жидкой фазы, рассчитанных по УС (7)
 Fig. 3. Comparisons of the values of the isobaric heat capacity in liquid phase calculated from Eq. 7

Данные разных авторов о скорости звука описываются с весьма высокой точностью – отклонения не превышают 0,1 – 0,3 %, однако диапазон исследования по температуре весьма узок – 253 – 413 К.

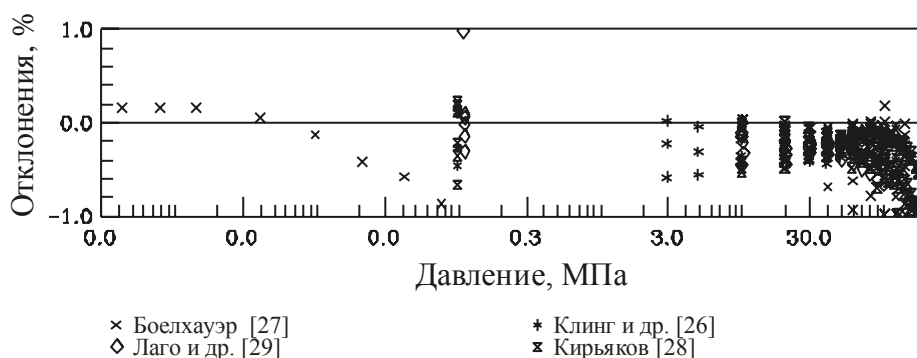


Рис. 4. Сравнение значений скорости звука, рассчитанных по УС (7)
 Fig. 4. Comparisons of the values of the speed of sound calculated from Eq. 7

Таблица 3. Сравнение экспериментальных данных о ТДС n-нонана с УС (6) и (7)
 Table 3. Comparison of experimental data for thermodynamic properties of n-nonane with the equations of state (6) and (7)

Год	Автор, источник	Точки	Диапазон параметров		САО, %	
			T, К	p, МПа	УС (7)	УС (6)
P, V, T - данные						
1953	Кармайл и др. [6]	86	311-511	0,167-69	0,266	0,299
1960	Боелхауэр и др. [7]	52	303-393	0,1-118	0,192	0,244
1964	Дулитл [8]	66	303-573	5-500	0,312	0,345
1978	Гриндли и Линд [9]	502	303-423	20-800	0,284	0,191
1980	Скайфи и др. [10]	188	248-373	0,1-301	0,076	0,168
1991	Курумов [11]	229	223-595	0,1-130	0,398	0,635
1991	Курумов (газ.) [11]	67	498-595	0,5-2,0	0,587	1,434

Окончание табл. 3
End of the table 3

Год	Автор, источник	Точки	Диапазон параметров		САО, %	
			T, К	p, МПа	УС (7)	УС (6)
1991	Курумов (надкр.) [11]	68	596-623	0,1-5,0	0,964	1,130
1991	Банипал и др. [12]	72	313-373	0,1-10	0,062	0,072
Давление насыщенных паров						
1945	Виллингхэм и др. [13]	20	343-425		0,106	0,048
1949	Форциати и др. [14]	20	343-425		0,091	0,04
1953	Кармайкл и др. [6]	13	311-511		0,457	0,575
1973	Карруч [15]	10	220-308		18,12	18,26
1991	Курумов [11]	16	473-594		2,466	2,749
2001	Ортега и др. [16]	46	403-439		0,880	0,963
2010	Расчет по C_s [17]	7	220-300		1,291	1,111
Плотность насыщенной жидкой фазы						
1930	Дорнте и Смит [18]	11	223-423		0,122	0,047
1951	Дулитл и др. [19]	9	263-423		0,078	0,125
1978	Гриндли и Линд [9]	13	303-423		0,123	0,102
1986	Плебански и др. [20]	10	300-390		0,063	0,049
1991	Амирханов и др. [21]	27	273-594		0,386	0,402
1991	Курумов [11]	23	223-594		0,270	0,362
Плотность насыщенной газовой фазы						
1991	Амирханов и др. [21]	10	553-594		4,825	4,337
1991	Курумов [11]	6	498-594		2,267	2,071
Изобарная теплоемкость C_p						
1930	Паркс и др. [22]	8	225-299		0,608	0,706
1991	Банипал и др. [12]	72	318-373	0,1-10	0,454	0,466
2000	Герасимов [23]	82	324-589	0,5-60	0,519	0,697
2000	Герасимов (газ.) [23]	17	505-586	0,-2,0	1,853	1,125
2000	Герасимов (надкр.) [23]	19	608-625	0,5-60	0,593	1,749
Теплоемкость по линии насыщения C_s						
1947	Осборн и др. [24]	9	278-318		0,429	0,349
1954	Финке и др. [25]	22	225-314		1,060	1,145
Изохорная теплоемкость C_v						
1991	Амирханов [21]	36	425-593	0-19,8	1,167	1,069
1991	Амирханов (газ.) [21]	11	553-663	1,3-4,4	2,074	1,468
1991	Амирханов (надкр.) [21]	83	598-693	3,0-12,2	1,681	1,240
1953	Клинг и др. [26]	24	293-373	0,098-49	0,208	0,364
1967	Боелхауэр [27]	89	253-413	10-140	0,234	0,340
1981	Кирьяков [28]	126	303-393	0,1-196	0,265	0,319
2005	Лаго и др. [29]	66	293-393	0,11-100	0,130	0,276

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное фундаментальное уравнение состояния позволяет надежно рассчитывать все термодинамические свойства н-нонана в диапазоне температуры

от тройной точки до ~700 К при давлениях до 100 МПа. Возможность надежной экстраполяции по температуре и давлению обеспечивается «правильным» ходом производных термодинамических величин на всей поверхности состояния.

Средние относительные погрешности расчета термодинамических величин по фундаментальному УС имеют следующие значения: давление насыщенного пара – 0,2 – 0,8; плотность насыщенной жидкой фазы – 0,06 – 0,3 ; плотность насыщенной газовой фазы – 3 – 5 ; плотность жидкой фазы – 0,1– 0,3; плотность газовой фазы – 0,6 ; теплоемкости c_s и c_p и скорость звука – 0,2 – 0,8 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00683-а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Span, R. Multiparameter Equation of State: An Accurate Source of Thermodynamic Property Data / R. Span. – Berlin: Springer, 2000. – 367 p.
2. Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP*, Version 8.0, NIST, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2007.
3. Lemmon, E.W. Short Fundamental Equations of State for 20 Industrial Fluids / E.W. Lemmon, R. Span // J. Chem. Eng. Data. – 2006. – Vol. 51. – P. 785 – 850.
4. Sun, L. Universal equation of state for engineering application: algorithm and application / L. Sun, J.E. Ely // Fluid Phase Equilibria. – 2004. – Vol. 222– 223. – P. 107 – 118.
5. Александров, И.С. Современный подход в разработке фундаментальных уравнений состояния технически важных рабочих веществ / И.С. Александров, Б.А. Григорьев, А.А. Герасимов // Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. Ч. 2: сборник научных статей. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – С. 124-137.
6. Carmichael, L.T. Phase Equilibria in Hydrocarbon Systems, Volumetric Behavior of n-Nonane / L.T. Carmichael, B.H. Sage, W.N. Lacey // Ind. Eng. Chem. – 1953. – Vol. 45. – P. 2697 – 2699.
7. Boelhouwer, J.W.M. PVT Relations of Five Liquid n-Alkanes / J.W.M. Boelhouwer // Physica. – Vol. 26, № 11. – P. 1021 – 1028.
8. Doolittle, A.K. Specific volumes of n-alkanes / A.K. Doolittle // J. Chem. Eng. Data. – 1964. – Vol. 9, № 2. – P. 275 – 279.
9. Grindley, T. The residual energy and entropy of hydrocarbon liquids and their relation to the liquid structure / T. Grindley, J.E.Jr. Lind // J. Chem. Phys. – 1978. – Vol. 68, № 11. – P. 5046 – 5052.
10. Scaife, W.G.S. Dielectric permittivity and pvT data of some n-alkanes / W.G.S. Scaife, C.G.R. Lyons // Proc. R. Soc. London. – 1980. – Vol. 370. – P. 193–211.
11. Курумов, Д.С. Термические свойства n-алканов и фракций Мангышлакской нефти в жидком и газообразном состояниях / 05.14.05: дисс... докт. техн. наук / Д.С. Курумов. – Грозный: ГНИ, 1991. – 440 с.
12. Banipal, T.S. Heat Capacities and Densities of Liquid n-Octane, n-Nonane, n-Decane, and n-Hexadecane at Temperatures from 318.15K to 373.15 K and at Pressures up to 10 MPa / T.S. Banipal, S.K. Garg, J.C. Ahluwalia // J. Chem. Thermodyn. – 1991. – Vol. 23. – P. 923 – 931.

13. Willingham, C.B. Vapor pressures and boiling points of some paraffin, alkylcyclopentane, alkylcyclohexane, and alkylbenzene hydrocarbons / C.B. Willingham, W.J. Taylor, J.M. Pignocco, et. al. // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* – 1945. – V.35. – P. 219 – 244.
14. Forziati, A.F. Vapor pressures and boiling points of sixty API-NBS hydrocarbons / A.F. Forziati, W.R. Norris, F.D. Rossini // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* – 1949. – Vol. 43. – P. 555 – 563.
15. Carruth, G.F. Vapor Pressure of Normal Paraffins Ethane through n-Decane from their Triple Points to about 10 mm Hg / G.F. Carruth, R. Kobayashi // *J. Chem. Eng. Data.* – 1973. – Vol. 18, № 2. – P. – 115 –126.
16. Ortega, J. Vapor-liquid equilibria for binary systems composed of a propylester (ethanoate, propanoate, butanoate) + an n-alkane (C7, C9) / J. Ortega, C. Gonzalez, S. Galvan // *J. Chem. Eng. Data.* – 2001. – Vol. 46.– P. 904 – 912.
17. Александров, И.С. Энтальпия испарения и давление насыщенных паров n-алканов $C_5 - C_{18}$ вблизи тройной точки / И.С. Александров, А.А. Герасимов, Е.Б. Григорьев // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.* – 2010. – № 4. – С. 56 – 61.
18. Dornste, R.W. The dielectric polarization of liquids. X. The polarization and refraction of the normal paraffins / R.W. Dornste, C.P. Smyth // *J. Am. Chem. Soc.* – 1930. – Vol. 52. – P. 3546 – 3552.
19. Doolittle, A.K. Preparation and physical properties of a series of n-alkanes / A.K. Doolittle, R.H. Peterson // *J. Am. Chem. Soc.* – 1951. – Vol. 73. – P. 2145 – 2151.
20. Plebanski, T.A dilatometric method for measuring the density of organic liquid at elevated temperatures / T. Plebanski, M. Wozniak, K. Wilanowska // *Nauchn. Apparat.* – 1986. – Vol. 1. – P. 47 – 59.
21. Изохорная теплоемкость и другие калорические свойства углеводородов метанового ряда / Х.И. Амирханов [и др.]–Махачкала: Даг. кн. изд-во, 1981. – 254 с.
22. Parks, G.S. Thermal data on organic compounds. VI. The heat capacities, entropies and free energies of some saturated non-benzenoid hydrocarbons / G.S. Parks, H.M. Huffman, S.B. Thomas // *J. Am. Chem. Soc.* – 1930. – Vol. 52, № 3. – P. 1032 – 1041.
23. Герасимов, А.А. Калорические свойства нормальных алканов и многокомпонентных углеводородных смесей в жидкой и газовой фазах, включая критическую область: дисс... докт. техн. наук / А.А. Герасимов. – Калининград, 2000. – 434 с.
24. Osborne, N. S. Measurements of heat capacity of a number of hydrocarbons / N.S. Osborne, D.C. Ginnings // *J. Research NBS.* –1947. – Vol. 39, № 5.– P. 453 – 477.
25. Low-temperature thermal data for the nine normal paraffin hydrocarbons from octane to hexadecane / H.L. Finke [et al.] // *J. Am. Chem. Soc.* –1954. – Vol. 76. – P. 333 – 341.
26. Kling, R. Application of ultrasonics in the study of the elastic properties of hydrocarbons over a wide field of temperature and pressure. Application des ultrasons a l'etude des proprietes elastiques d'hydrocarbures dans un domaine etendu de temperature et de pression / R. Kling, E. Nicolini, J. Tissot // *Rech. Aeronaut.*– 1953. – Vol. 31. – P. 31–36.

27. Boelhouwer, J.W.M. Sound velocities in and adiabatic compressibilities of liquid alkanes at various temperatures and pressures / J.W.M. Boelhouwer // Physica. – 1967. – Vol. 34, № 3. – P. 484 – 492.

28. Кирьяков, Б.С. Акустические и упругие свойства в ряду n-парафинов при давлениях до 2000 ат.: 01.04.15: дисс...канд. ф.-м. наук / Б.С. Кирьянов. – Курск, 1981. – 140 с.

29. Lago, S. Speed of sound measurements in n-nonane at temperature between 293.15 and 393.15 K and at pressures up to 100 MPa / S. Lago, P.A. Giuliano Albo, D. Madonna Ripa // Int. J. Thermophys. - 2005.

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF TECHNICALLY IMPORTANT HYDROCARBONS. NORMAL NONANE

I.S. Alexandrov, A.A. Gerasimov

The modern fundamental equations of state are analyzed together for calculating the thermodynamic properties of technically important substances. The fundamental equation of state is obtained for normal nonane, which is a technically important organic working substance. The uncertainties of properties calculated using the equation (with the exception of the critical region $0.98 \leq \tau \leq 1.05$ and $0.7 \leq \delta \leq 1.3$) are as follows: density of the single phase: 0.1 – 0.3 %; saturated vapor pressure: 0.2 – 0.8 %; heat capacity: 0.6 – 0.8 % and speed of sound: 0.2 – 0.3 %.

normal alkanes, n-nonane, density, temperature, heat capacity, speed of sound