

11/25

Izvestija vyssich uĉebnych zavedenij  
NEFT' I GAZ (1959) Nr 12, S. 95-98

Hydraulik und Thermodynamik in der  
Erdölindustrie

Cojman, G.I.

Odesskoe proektno-konstruktorskoe bjuro  
<Projektierungs- und Konstruktionsbüro  
Odessa>

Zustandsgleichung und thermodynamische  
Eigenschaften von Ammoniak

In der vorliegenden Arbeit wird eine Zustandsgleichung für Ammoniak vorgeschlagen, die im Dichtebereich zwischen dem Nullpunkt und zwei kritischen Dichten gilt. Die Gleichung kann zur Bestimmung sowohl der thermischen als auch der kalorischen Größen von Ammoniak bei beliebigen, für praktische Zwecke notwendigen Temperaturen bis zur Sättigungskurve angewandt werden.

In den letzten Jahren ist das Interesse an den thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak im Zusammenhang mit seiner stetig zunehmenden Anwendung als Ausgangsstoff für die Synthese vieler Stoffe, die in verschiedenen Industriezweigen und in der Landwirtschaft weitestgehend verwendet werden, in starkem Maße gestiegen.

Zur Projektierung von Apparaten und Werken für die Synthese dieser Stoffe ist die Kenntnis der thermodynamischen Eigenschaften des Ausgangsstoffes - von Ammoniak - notwendig. Des weiteren ist die Kenntnis der thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak unerlässlich infolge seiner breiten Anwendung in Kältemaschinen (besonders in Kältemaschinen mit großer Leistungsfähigkeit).

Trotz seiner so großen Bedeutung ist Ammoniak bis heute noch völlig unzureichend untersucht.

Die von einigen Autoren [1, 2] durchgeführten Untersuchungen der thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak betrafen in der Hauptsache seine Anwendung in der Kälteindustrie; die Angaben dieser Autoren erstrecken sich daher auf einen begrenzten Bereich - auf Temperaturen von  $-42$  bis  $204,5^{\circ}\text{C}$  und Drücke von  $0,062$  bis  $21,09 \text{ kg/cm}^2$ . In einem weitaus größeren

Bereich der Parameteränderung (für Temperaturen von  $30^{\circ}$  bis  $200^{\circ}\text{C}$  und für spezifische Volumina von  $1,8$  bis  $6 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) untersuchte Keyes [3] die Kompressibilität von Ammoniak.

Beattie und Lourence [4] untersuchten die p-V-T-Werte von Ammoniak im Bereich der spezifischen Volumina von  $20$  bis  $95 \text{ cm}^3/\text{g}$  und zwischen  $75$  und  $325^{\circ}\text{C}$ .

Kazarnovskij [5] stellte Versuche über die thermischen Eigenschaften von Ammoniak im Temperaturbereich zwischen  $200$  und  $300^{\circ}\text{C}$  und im Bereich der spezifischen Volumina von  $2,0256$  bis  $18,254 \text{ cm}^3/\text{g}$  an.

Die diesbezüglichen Untersuchungen der anderen Autoren erstrecken sich auf einen begrenzten Bereich spezifischer Volumina und Temperaturen.

In der Arbeit von Beattie und Lourence wird ebenfalls eine Zustandsgleichung für Ammoniak gegeben, die von den Autoren auf der Basis der von ihnen gefundenen Versuchswerte sowie der Angaben von Meyers und Jessup [6] aufgestellt wurde. Eine von uns durchgeführte Untersuchung dieser Gleichung ergab, daß sie nur für einen engen Dichtebereich gilt und keine zuverlässige Extrapolation der Werte auf einen Bereich großer Dichten erlaubt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Zustandsgleichung für Ammoniak vorgeschlagen, die mit hoher Genauigkeit die p-V-T-Meßwerte wiedergibt. Bei der Aufstellung der Gleichung wurden die oben genannten Versuchswerte von Keyes [3], Beattie und Lourence [4] und von Kazarnovskij [5] benutzt sowie die von Henning [7] veröffentlichten Werte. Eine gründliche Analyse dieser Werte ergab, daß sie untereinander starke Differenzen aufweisen. Aus diesem Grund wurde von uns ihr Ausgleich nach Isochoren- und Isothermen-Schnitten der thermodynamischen Zustandsfläche von Ammoniak in zwei Systemen dimensionsloser Koordinaten  $\sigma = \sigma(\omega)$  und  $\sigma = \sigma(\tau)$  vorgenommen, wobei

- <a> der dimensionslose Faktor ist;
- <b> die reduzierte Temperatur;
- <c> die reduzierte Dichte.

Das auf diese Weise erhaltene System von Stützwerten von  $\sigma$  legten wir der Aufstellung einer Zustandsgleichung für Ammoniak zugrunde. Dabei wurde die allgemeine Methode der Aufstellung einer Zustandsgleichung von Ja.Z. Kazavčinskij [9] von uns konkret auf Ammoniak angewandt.

Entsprechend der oben genannten Untersuchung [9] sieht die zweckmäßige Form der Zustandsgleichung in dimensionslosen Koordinaten folgendermaßen aus

(1),

wobei  $\alpha_0, \alpha_1, \beta$  und  $\mathcal{J}$  nur Funktionen der reduzierten Dichte  $\omega$  sind und

$\varphi$  nur die monoton fallende Funktion der reduzierten Temperatur  $\tau$  ist.

Der Versuch zeigt, daß man sich für viele Stoffe, darunter auch für Ammoniak, allein auf die ersten drei Glieder der Gleichung (1) beschränken kann.

In diesem Fall sieht die Zustandsgleichung wie folgt aus:

(2)

Aus der Gleichung (2) geht hervor, daß das Problem der Aufstellung einer Zustandsgleichung im wesentlichen darauf hinausläuft, die Elementar-Funktionen von  $\alpha_0, \alpha_1, \beta$  und  $\varphi$  (die nur von einer Variablen abhängen) zu ermitteln. Da die nach Isothermen und Isochoren aufgegliederten p-V-T-Versuchswerte bekannt sind, können - insofern die Funktion der Temperatur  $\varphi$  bekannt ist - die Elementar-Funktionen von  $\alpha_0, \alpha_1$  und  $\beta$  leicht bestimmt werden.

Die vorgenommene Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung des zweiten Virialkoeffizienten ergab, daß die Temperaturfunktion  $\varphi$ , die eine fallende Funktion der Temperatur ist, mit hinreichender Genauigkeit für praktische Zwecke folgendermaßen aufgestellt werden kann:

(3)

Mit Hilfe dieses Ausdrucks der Temperatur-Funktion wurden mit der oben genannten Methode [9] folgende analytische Beziehungen der Elementar-Funktionen gewonnen:

<d>

<e>

(4)

<f>

Folgende Isothermen wurden dabei als Basisisothermen angenommen: die kritische Isotherme  $t_k = 132,4^{\circ}\text{C}$ , die Isotherme  $t_2 = 200^{\circ}\text{C}$  und die Isotherme  $t_3 = 275^{\circ}\text{C}$ .

Für diese Isothermen wurden analytische Ausdrücke aufgestellt, aus denen die Beziehungen (4) gewonnen wurden.

Entsprechend den Angaben aus dem Handbuch [10] wurden folgende kritischen Parameter von Ammoniak angenommen:

$$p_k = 115,21 \text{ kg/cm}^2; \quad t_k = 132,4^{\circ}\text{C}; \quad V_k = 4,2553 \text{ l/kg} .$$

Zur Überprüfung der gewonnenen Zustandsgleichung wurde von uns ein Vergleich der nach den Versuchsangaben [3, 4, 5] berechneten Werte von  $\sigma$  mit den nach der Gleichung errechneten Werten von  $\sigma$  im Dichtebereich  $\omega = 0 \div 2$  bei Temperaturen von 75 bis  $300^{\circ}\text{C}$ . durchgeführt.

Der Vergleich ergab, daß die mittlere Abweichung der errechneten Werte für  $\sigma$  von den Versuchswerten nicht über den Rahmen der Fehlerhaftigkeit des Versuchs, die von Keyes z.B. auf 0,25% geschätzt wurde, hinausgeht mit Ausnahme der Keyes-Isothermen, wo die mittlere Abweichung innerhalb eines Bereichs von 0,55% liegt.

Diese Abweichung der errechneten Werte von  $\sigma$  von den Meßwerten von Keyes hat ihre Ursache in den bei der Aufeinanderabstimmung festgestellten merklichen Differenzen zwischen den Meßwerten von [3] und [5].

So kreuzen sich beispielsweise die Versuchsisochoren von [3] und die Isochoren von [5] (für die gleiche Dichte  $\omega$ ) und schon bei einer Temperatur von  $t = 200^{\circ}\text{C}$  erreicht die Differenz zwischen den Angaben [3] und [5] 1%.

Abgesehen davon erfüllt ein Teil der Versuchspunkte von Keyes nicht einen glatten Kurvenverlauf.

Bei der Abstimmung der p-V-T-Werte wurde den Angaben [4], [5] und [7], die untereinander gut abgestimmt sind und mit

den von Plank veröffentlichten Angaben an der Sättigungskurve [8] übereinstimmen, der Vorzug gegeben.

Hierbei ist darauf hinzuweisen, daß die mittlere Abweichung der errechneten Werte  $\phi$  von den Soll-Werten  $\phi$  über 0,03% auf allen Isothermen nicht hinausgeht. Eine analoge Überprüfung der Gleichung wurde für die Sättigungskurve durchgeführt. Die weiter unten folgende Tabelle bringt einen Vergleich der mit der vorgeschlagenen Gleichung errechneten Größen des Drucks  $p_{err}$  an der Sättigungskurve mit den von Plank veröffentlichten [8] Größen  $p_{vers}$  an der Sättigungskurve.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, geht die mittlere Abweichung der berechneten Druck-Größen an der Sättigungskurve von den Versuchsgrößen nicht über 0,28% hinaus und die Maximalabweichung beträgt 0,55%.

Die Gegenüberstellung zeigt, daß die vorgeschlagene Zustandsgleichung mit hoher Genauigkeit alle Zustandsflächenbesonderheiten von Ammoniak beschreibt, dadurch daß sie den Meßwerten im ganzen Dichtebereich  $\omega = 0 \div 2$ , einschließlich der Sättigungskurve, gerecht wird.

Die Zustandsgleichung (2) basiert auf der Berechnung der Gesetzmäßigkeit der Veränderung thermischer Größen in Abhängigkeit von der Temperaturänderung und läßt eine weite Extrapolation sowohl in den Bereich hoher als auch in den Bereich tiefer Temperaturen zu.

Mit Hilfe der bekannten thermodynamischen Beziehungen können - wenn die Werte für  $c_{p_0}$  bekannt sind - aus der Gleichung (2) leicht die Ausdrücke für die Berechnung der kalorischen Größen gewonnen werden. Wie Untersuchungen für eine Reihe von Stoffen zeigten [11, 12], gewährleistet diese Berechnung eine große Genauigkeit der berechneten Größen. Folglich kann die Gleichung (2) zur Berechnung ausführlicher Tabellen über thermodynamische Eigenschaften und zur Aufstellung von Zustandsdiagrammen von Ammoniak bei allen für praktische Zwecke notwendigen Temperaturen bis zur Sättigungskurve im Dichtebereich  $0 < \omega < 2$  angewandt werden.

Tabelle (S. 98) Vergleich der mit der Gleichung errechneten Druckwerte an der Sättigungskurve -  $p_{ras0}^V$   $\langle p_{err} \rangle$  - mit den Angaben von Plank [8] -  $p_{op}$   $\langle p_{Vers} \rangle$ .

$t,$ $^{\circ}C$	$p_{ras0}^V,$ $kg/cm^2$	$p_{op},$ $kg/cm^2$	Abweichung $= \frac{p_{ras0}^V - p_{op}}{p_{ras0}^V},$
---------------------	----------------------------	------------------------	---

$$sr = 0,28$$

$\langle$ mittlere Abweichung $\rangle$

L i t e r a t u r

1. National Bureau of Standards, (1945) Circular Nr 142
2. National Bureau of Standards, (1948) Circular Nr 472
3. K e y e s , F.: Journal of the American Chem. Soc., (1931)  
vol. 53, p. 965
4. B e a t t i e and L o u r e n c e: Journal of the Amer.  
Chem. Soc., (1930) vol. 52, p. 6
5. K a z a r n o v s k i j , Ja.S.: "Acta Physicochimica"  
(1940) vol. 12, Nr 4
6. M e y e r s and J e s s u p: Refrig. Eng., 11 (1925)  
S. 345
7. H e n n i n g , F.: Wärmetechnische Richtwerte, Berlin,  
1938
8. P l a n k , R.: "Handbuch der Kältetechnik", Bd 4, Berlin,  
1956
9. K a z a v ě i n s k i j , Ja.Z.: "Teploenergetika" (1954)  
Nr 7; DAN SSSR 95 (1954) str. 1005;  
"Teploenergetika" (1958) Nr 7
10. V a r g a f t i k , N.B.: Spravočnik (Handbuch) "Teplofizi-  
českíe svojstva vešćestv", Gosenergoiz-  
dat, M.-L., 1956
11. K a z a v ě i n s k i j , Ja.Z., O.I. Katče: "Teploenergeti-  
ka" (1958) 7
12. Z a g o r u ě e n k o , V.A.: "Neft' i gaz" (1959) Nr 2

Eingegangen am 14. 4. 1959

Stuttgart, den 22.5.1968

i.A.

*Monika Wagenknecht*

(Monika Wagenknecht)  
Dipl.-Übersetzerin

Гидравлика и термодинамика  
в нефтяной промышленности

Г. И. ШОЙМАН

Одесского проектно-конструкторского бюро

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АММИАКА

*В настоящей работе предлагается уравнение состояния аммиака, справедливое в интервале плотностей от нуля до двух критических плотностей. Уравнение пригод-но для определения как термических, так и калорических величин аммиака при любых практически необходимых температурах вплоть до кривой насыщения.*

В последние годы значительно увеличился интерес к термодинамическим свойствам аммиака в связи с все более расширяющимся применением его в качестве сырья для синтеза целого ряда веществ, широко используемых в различных отраслях промышленности и в сельском хозяйстве.

Для проектирования аппаратов и заводов для синтеза этих веществ необходимо знание термодинамических свойств исходного сырья—аммиака. Знание термодинамических свойств аммиака необходимо также в силу широкого использования его в холодильных машинах (особенно в машинах большой холодопроизводительности) и в целом ряде других отраслей техники.

Несмотря на столь важное значение аммиака, до настоящего времени он изучен еще далеко недостаточно.

Проведившиеся некоторыми авторами [1, 2] исследования термодинамических свойств аммиака в основном касались применения его в холодильной промышленности и поэтому данные этих авторов покрывают узкий интервал—по температурам от  $-42$  до  $204,5^{\circ}\text{C}$  и по давлениям—от  $0,062$  до  $21,09 \text{ кг см}^2$ . В более широком интервале изменения параметров (по температурам—от  $30^{\circ}$  до  $200^{\circ}\text{C}$  и по удельным объемам от  $1,8$  до  $6 \text{ см}^3/\text{г}$ ) сжимаемость аммиака исследовал Кейес [3].

Битти и Лоуренс [4] исследовали  $p$ ,  $V$ ,  $T$  данные аммиака в интервале удельных объемов от  $20$  до  $95 \text{ см}^3/\text{г}$  и от  $75$  до  $325^{\circ}\text{C}$ .

Казарновский [5] исследовал термические свойства аммиака в интервале температур от  $200$  до  $300^{\circ}\text{C}$  и в интервале удельных объемов от  $2,0256$  до  $18,254 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Имеющиеся исследования других авторов охватывают узкий диапазон удельных объемов и температур.

В работе Битти и Лоуренса представлено также уравнение состояния аммиака, составленное авторами на основании полученных ими экспериментальных данных, а также данных Мейерса и Джессепа [6]. Проведенное нами исследование этого уравнения показало, что оно справедливо в узком интервале плотностей и не позволяет производить надежную экстраполяцию данных в область высоких плотностей.

В настоящей работе предлагается уравнение состояния аммиака, удовлетворяющее с высокой точностью экспериментальным  $p$ ,  $V$ ,  $T$

данным. При составлении уравнения были использованы упоминавшиеся экспериментальные данные Кейеса [3], Битти и Лоуренса [4] и Казарновского [5], а также данные, опубликованные Геншигом [7]. Тщательный анализ этих данных показал, что между ними имеются значительные расхождения. Поэтому нами было произведено согласование их по изохорным и изотермическим сечениям термодинамической поверхности аммиака в двух системах безразмерных координат  $\sigma = \sigma(\omega)$  и  $\sigma = \sigma(\tau)$ ,

где  $\sigma = \frac{p \cdot V}{RT_k}$  — безразмерный комплекс;

$\tau = \frac{T}{T_k}$  — приведенная температура;

$\omega = \frac{V_k}{V}$  — приведенная плотность.

Полученная таким образом система опорных значений  $\sigma$  была нами положена в основу при составлении уравнения состояния аммиака. При этом использована общая методика составления уравнения состояния Я. З. Казавчинского [9], конкретно примененная нами для аммиака.

Согласно указанному исследованию [9], рациональная форма уравнения состояния в безразмерных координатах имеет вид

$$\sigma = z_0 + z_1 \cdot \tau + \beta \cdot \psi + \gamma \cdot \psi^2, \quad (1)$$

где  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  — функции только приведенной плотности  $\omega$ ,

$\psi$  — монотонно убывающая функция только приведенной температуры  $\tau$ .

Опыт показывает, что для многих веществ, в том числе и для аммиака, можно ограничиться только первыми тремя членами уравнения (1).

В таком случае уравнение состояния примет вид

$$\sigma = z_0 + z_1 \tau + \beta \psi. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что задача составления уравнения состояния сводится, по существу, к отысканию элементарных функций  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $\beta$  и  $\psi$  (зависящих только от одной переменной). Имея опытные  $p$ ,  $V$ ,  $T$  данные, представленные по изотермам и изохорам, можно легко определить элементарные функции  $z_0$ ,  $z_1$  и  $\beta$ , если известна температурная функция  $\psi$ .

Произведенное выделение криволинейной части второго вирнального коэффициента показало, что температурная функция  $\psi$ , являясь убывающей функцией температуры, с достаточной для практики точностью может быть представлена так:

$$\psi = \frac{1}{\tau^3} + \frac{0,001110}{\tau^{12}}. \quad (3)$$

На основании этого выражения температурной функции указанным выше методом [9] были получены следующие аналитические выражения элементарных функций:

$$z_0 = -1,484828 \cdot \omega - 0,478994 \cdot \omega^2 - 0,398473 \cdot \omega^3 - 0,139780 \cdot \omega^4 + \\ + 0,019703 \cdot \omega^5;$$

$$z_1 = 1 + 0,646848 \cdot \omega + 0,396120 \cdot \omega^2 - 0,200125 \cdot \omega^3 + 0,082680 \cdot \omega^4 - \\ - 0,011691 \cdot \omega^5;$$

$$\beta = -0,677645 \cdot \omega + 0,989734 \cdot \omega^2 - 0,378324 \cdot \omega^3 + 0,089226 \cdot \omega^4 - \\ - 0,009629 \cdot \omega^5.$$

При этом в качестве базовых были приняты следующие изотермы: критическая изотерма  $t_k = 132,4^\circ\text{C}$ , изотерма  $t_2 = 200^\circ\text{C}$  и изотерма  $t_3 = 275^\circ\text{C}$ .

Для этих изотерм были составлены аналитические выражения, из которых получены выражения (4).

Критические параметры аммиака были приняты по справочным данным [10] следующие:

$$p_k = 115,21 \text{ кг/см}^2; t_k = 132,4^\circ\text{C}; V_k = 4,2553 \text{ л/кг}.$$

С целью проверки полученного уравнения состояния нами было проведено сравнение значений  $\sigma$ , вычисленных по опытным данным [3, 4, 5], со значениями  $\sigma$ , рассчитанными по уравнению, в интервале плотностей  $\omega = 0 \div 2$  при температурах от  $75$  до  $300^\circ\text{C}$ .

Сравнение показало, что среднее отклонение расчетных значений  $\sigma$  от опытных не выходит за пределы погрешности эксперимента, оцениваемой Кейесом, например, в  $0,25\%$ , за исключением изотерм Кейеса, где среднее отклонение лежит в пределах  $0,55\%$ .

Такое отклонение расчетных значений  $\sigma$  от экспериментальных данных Кейеса объясняется значительными расхождениями между экспериментальными данными [3] и [5], обнаруженными при их согласовании.

Так, например, экспериментальные изохоры [3] и изохоры [5] (для одной и той же плотности  $\omega$ ) между собой пересекаются и уже при температуре  $t = 200^\circ\text{C}$  расхождения между данными [3] и [5] достигают  $1\%$ .

Кроме того, часть экспериментальных точек Кейеса не ложится на плавные кривые.

При согласовании  $p$ ,  $V$ ,  $T$  данных предпочтение было отдано данным [4], [5] и [7], хорошо согласующимся между собой и с данными на кривой насыщения, опубликованными Планком [8].

При этом следует отметить, что среднее отклонение расчетных значений  $\sigma$  от опорных значений  $\sigma$  не превышает  $0,03\%$  на всех изотермах. Аналогичная проверка уравнения была произведена по кривой насыщения. Ниже в таблице приведено сравнение значений давления  $p_{\text{расч}}$  на кривой насыщения, рассчитанных по предлагаемому уравнению со значениями давления  $p_{\text{оп}}$  на кривой насыщения, опубликованными Планком [8].

Как видно из таблицы, среднее отклонение расчетных значений давления на кривой насыщения от опытных не превышает  $0,28\%$ , а максимальное отклонение составляет  $0,55\%$ .

Приведенные сопоставления показывают, что предлагаемое уравнение состояния с высокой точностью описывает все особенности

поверхности состояния аммиака, хорошо удовлетворяя опытным данным во всем интервале плотностей  $\omega = 0 \div 2$ , включая и кривую насыщения.

Сравнение значений давления на кривой насыщения  $P_{расч.}$ , рассчитанных по уравнению, с данными Планка [8] —  $P_{оп.}$

$t$ , °C	$\omega$	$P_{расч.}$ кг/с.м <sup>2</sup>	$P_{оп.}$ кг/с.м <sup>2</sup>	Отклонение $\delta = \frac{P_{расч.} - P_{оп.}}{P_{расч.}}$ , %
-66	0,000618	0,1482	0,1485	-0,20
-56	0,001152	0,2883	0,2889	-0,20
-46	0,002015	0,5244	0,5256	-0,23
-35	0,003502	0,9473	0,9503	-0,30
-25	0,005518	1,540	1,546	-0,39
-15	0,008365	2,399	2,410	-0,45
5	0,012267	3,601	3,619	-0,50
5	0,017476	5,230	5,259	-0,55
15	0,024330	7,388	7,427	-0,52
25	0,033167	10,176	10,225	-0,48
35	0,044372	13,693	13,765	-0,53
45	0,058613	18,097	18,165	-0,37
55	0,076386	23,46	23,55	-0,38
65	0,098820	29,98	30,06	-0,26
75	0,127267	37,82	37,84	-0,05
85	0,163521	47,10	47,05	+ 0,11
95	0,210252	57,94	57,84	+ 0,17
105	0,271488	70,37	70,36	+ 0,01
115	0,356241	84,53	84,79	-0,30
125	0,502456	101,09	101,33	-0,24
125	1,538765	101,40	101,33	+ 0,07

$$\delta_{ср} = 0,28$$

Уравнение состояния (2) основано на учете закономерности изменения термических величин с изменением температуры и допускает широкую экстраполяцию как в область высоких, так и в область низких температур.

С помощью известных термодинамических соотношений из уравнения (2) легко могут быть получены выражения для расчета calorических величин, если известны значения  $c_{p0}$ . Как показали исследования по ряду веществ [11, 12], такой расчет обеспечивает высокую точность расчетных величин. Следовательно, уравнение (2) может быть использовано для расчета подробных таблиц термодинамических свойств и построения диаграмм состояния аммиака при всех практически необходимых температурах вплоть до кривой насыщения в интервале изменения плотности от нуля до двух критических плотностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. National Bureau of Standards, Circular № 142, 1945.
2. National Bureau of Standards, Circular № 472, 1948.
3. Keyes F. Journal of the American Chem. Soc., vol. 53, 1931, p. 965.
4. Beattie а. Lawrence. Journal of the Amer. Chem. Soc., v. 52, 1930, p. 6.
5. Казаринский Я. С. „Acta Physicochimica“, vol. XII. № 4, 1940.
6. Meyers а. Jessup. Refrig. Eng., II, 345, 1925.
7. Henning F. Warmetechnische Richtwerte, Berlin, 1938.
8. Planck R. „Handbuch der Kältetechnik“, В 4. Berlin, 1956.
9. Казавинский Я. З. „Теплоэнергетика“, № 7, 1954; ДАН СССР, 95, 1954, стр. 1005; „Теплоэнергетика“, № 7, 1958.
10. Варгафтик Н. Б. Справочник „Теплофизические свойства веществ“, Госэнергоиздат, М.—Л., 1956.
11. Казавинский Я. З., Катхе О. И. „Теплоэнергетика“, 7, 1958.
12. Загорученко В. А. „Нефть и газ“, № 2, 1959.

Поступила 14 IV 59