

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ МГЕ-46В, И-20А В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

*А. П. Щемелёв, В. С. Самуйлов, Н. В. Голубева, О. Г. Поддубский*

*Могилёвский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проектирование и моделирование различного оборудования требует надежных исходных данных по термодинамическим свойствам, используемых в этом оборудовании рабочих тел, в том числе минеральных масел. В настоящей работе впервые исследованы термодинамические свойства минеральных масел белорусского производства в широком диапазоне температур и давлений.

**Материалы и методы.** Для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А производства ОАО «Нафтан» измерения плотности выполнены с использованием плотномера с колеблющейся трубкой, скорость звука измерена импульсным методом. Выполнен расчет термодинамических свойств вышеупомянутых минеральных масел на основе экспериментальных данных по плотности и скорости звука. Методика расчета опирается на простые эмпирические зависимости удельного объема и изобарной теплоемкости, а также дифференциальные соотношения термодинамики.

**Результаты.** Измерены плотность и скорость звука для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А. Измерения выполнены при давлениях до 100,1 МПа. Плотность измерена для масла МГЕ-46В при температурах 298,15–393,15 К, для масла И-20А в интервале 298,15–343,15 К. Измерения скорости звука выполнены для масла МГЕ-46В при температурах 298,15–433,15 К и для масла И-20А в температурном диапазоне 298,15–343,15 К. Получены расчетные значения плотности, скорости звука, изобарной и изохорной теплоемкостей, изотермической и изэнтропной сжимаемости, изобарного коэффициента расширения в диапазоне температур 298,15–343,15 К при давлениях до 100 МПа.

**Выводы.** Подтверждена возможность расчета комплекса термодинамических свойств минеральных масел на основе результатов измерения плотности и скорости звука, без привлечения других исходных данных. Полученные значения термодинамических свойств и уравнения для их вычисления могут быть использованы при расчете, проектировании и моделировании оборудования, в котором используются минеральные масла МГЕ-46В и И-20А.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *минеральные масла; плотность; скорость звука; изобарная теплоемкость; изохорная теплоемкость; изобарный коэффициент расширения; изотермическая сжимаемость; изэнтропная сжимаемость.*

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Щемелёв, А. П. Термодинамические свойства минеральных масел МГЕ-46В, И-20А в широком диапазоне параметров состояния / А. П. Щемелёв [и др.] // Вестник МГУП. – 2020. – № 2(29). – С. 102–111.

## THERMODYNAMIC PROPERTIES OF MINERAL OILS MGE-46V, I-20A OVER A WIDE RANGE OF STATE PARAMETERS

*A. P. Shchamialiou, V. S. Samuilov, N. V. Holubeva, A. G. Paddubski*

*Mogilev State University of Food Technologies, Republic of Belarus*

### ABSTRACT

**Introduction.** Designing and modeling of various equipment requires reliable initial data on the thermophysical properties of the working fluids used in it, including mineral oils. The thermodynamic properties of Belarusian production mineral oils were first investigated over a wide range of temperatures and pressures.

**Materials and methods.** Density of mineral oils MGE-46V and I-20A produced by JSC «Naftan» was measured with a vibrating tube densitometer and pulse method was applied to determine the speed of sound. The calculation of the thermodynamic properties for the aforementioned mineral oils was carried out on the basis of experimental data on the density and speed of sound. The calculation method is based on simple empirical dependences of the specific volume and isobaric heat capacity, as well as on the relationship of thermodynamics.

**Results.** The density and speed of sound were measured for mineral oils MGE-46V and I-20A. The measurements were carried out at pressures up to 100.1 MPa. The density was measured for MGE-46V oil at temperatures from (298,15 to 393,15) K, for I-20A oil over the temperature range from (298,15 to 343,15) K.

The speed of sound was measured for MGE-46V oil at temperatures from (298,15 to 433,15) K and for I-20A oil over the temperature range from (298,15 K to 343,15) K. The values of the density, speed of sound, heat capacity at constant pressure and at constant volume, isobaric thermal expansivity, isothermal and isentropic compressibility were calculated at temperatures from (298,15 to 433,15) K at pressures up to 100 MPa.

**Conclusions.** The possibility of calculating the thermodynamic properties of mineral oils using the results of measuring density and speed of sound without any other initial data applied has been confirmed. The obtained values of thermodynamic properties and equations for their calculation can be used in the calculation, design and modeling of equipment in which mineral oils MGE-46V and I-20A are used.

**KEY WORDS:** *mineral oils; density; speed of sound; isobaric heat capacity; isochoric heat capacity; isobaric thermal expansivity; isothermal compressibility; isentropic compressibility.*

**FOR CITATION:** Shchamialiou A. P., Samuilov V. S., Holubeva N. V., Paddubski A. G. Thermodynamic properties of mineral oils MGE-46V, I-20A over a wide range of state parameters. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. – 2020. – No. 2(29). – P. – 102–111 (in Russian).

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и моделирование различного оборудования требует надежных исходных данных по теплофизическим свойствам, используемых в этом оборудовании рабочих тел, в том числе минеральных масел. Наибольшее распространение в технике до настоящего времени имеют минеральные и полусинтетические масла. В Беларуси существует крупнотоннажное производство минеральных масел на ОАО «Нафтан», в том числе базовых, промышленных, компрессорных, гидравлических и моторных. Минеральные масла выполняют разнообразные функции, такие как снижение трения, защита от коррозии, очистка поверхностей деталей от загрязнений, отвод теплоты, передача энергии и другие [1]. Поэтому при проектировании, моделировании и оптимизации оборудования, использующего эти жидкости, кроме вязкости, требуется знание таких термодинамических свойств, как плотность, сжимаемость, коэффициент расширения, теплоемкость. Предпочтительно наличие данных о перечисленных свойствах минеральных масел в широких интервалах температур и давлений, характерных для режимов работы оборудования, в котором эти жидкости используются. Увеличение точности расчетов и математических моделей процессов, происходящих в оборудовании, повышает требования к точности и надежности исходных данных, в том числе и к данным о теплофизических свойствах рабочих тел. Однако, учитывая большой ассортимент минеральных масел, для большинства из них данные о теплофизических свойствах в широких диапазонах параметров состояния отсутствуют.

В настоящей работе впервые выполнено экспериментальное исследование плотности и скорости звука гидравлического минерального масла МГЕ-46В и промышленного минерального масла И-20А производства ОАО «Нафтан» в широком диапазоне температур и давлений. На основе полученных экспериментальных данных для этих масел был выполнен расчет комплекса термодинамических свойств, включающего изобарную и изохорную теплоемкость, изобарный коэффициент расширения, изотермический и изэнтропный коэффициенты сжимаемости. Кроме того, получены уравнения, передающие зависимости вышеперечисленных свойств от температуры и давления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемых образцов использовались гидравлическое минеральное масло МГЕ-46В и промышленное минеральное масло И-20А производства ОАО «Нафтан».

Для этих двух образцов экспериментальные исследования плотности и скорости звука выполнены на комплексной установке, включающей в себя системы измерения плотности и скорости звука с собственными системами поддержания и измерения температуры и общей системой создания и измерения давления.

Система для определения плотности создана на основе измерительной ячейки плотнотемера НРМ Anton-Paar с колеблющейся U-образной трубкой, резонансный период колебаний

которой измерялся прибором mPDS 2000 V3. Стандартная неопределенность измерения периода составляла 1 нс. Теплоизолированная измерительная ячейка окружена алюминиевыми экранами термостата, температура которых во время эксперимента поддерживалась близкой к температуре ячейки, что минимизировало потери теплоты ячейки и градиенты температур внутри нее. Автоматическое регулирование температуры ячейки плотномера осуществлялось при помощи электронагревателей, размещенных на ее поверхности, и прецизионного регулятора температуры РТП 8.1 компании ИзТех. Измерение температуры ячейки производилось при помощи образцового платинового термометра сопротивления Hart Scientific (model: 5608), размещенного в ее центре, и многоканального измерителя температуры МИТ 8.15 компании ИзТех.

Измерение скорости звука выполнялось импульсным методом, на частоте акустической волны 3 МГц. Измерения скорости звука производились в акустической ячейке, помещенной в сосуд высокого давления, заполненный исследуемой жидкостью. Акустическая ячейка состоит из пьезокерамического акустического излучателя акустической волны и стального отражателя, разделенных трубкой из нержавеющей стали. Скорость звука измерялась посредством прямого измерения времени прохождения ультразвуковой волны через ячейку известной длины. Источником электрических импульсов, поступающих на пьезокерамическую пластину, служил генератор импульсов В-131. Время прохождения ультразвуковой волны через жидкость измерялось при помощи цифрового осциллографа В-121. Генератор и осциллограф входят в состав многофункционального измерительного комплекса УНИПРО. Погрешность определения временных интервалов не превышала 10 нс. Термостатирование автоклава с акустической ячейкой осуществлялось в жидком термостате. Температура определялась с помощью образцового платинового термометра сопротивления первого разряда ПТС-10М в комплекте с многоканальным измерителем температуры МИТ-8.15.

И при исследовании плотности и при исследовании скорости звука стандартная неопределенность измерения температуры составляла 0,01 К.

Как при измерении плотности, так и при измерении скорости звука, давление создавалось одновременно прессом, заполненным исследуемой жидкостью и масляным прессом грузопоршневого манометра МП-2500. Отсутствие разности давлений в измерительных ячейках и манометре контролировалось нуль-индикатором Ruska 2417-800. Стандартная относительная неопределенность измерения давления образцовым грузопоршневым манометром второго разряда МП-2500 составляла 0,02 %.

Подробно конструкция экспериментальной установки и методика измерения плотности описана в [2], а установки и методики измерения скорости звука в [3]. Там же представлены оценки точности измерений, которые показали, что относительная расширенная неопределенность измерения плотности, при вероятности охвата 0,99, составляет 0,03 %, а для скорости звука – 0,1 %.

Расчет термодинамических свойств минеральных масел выполнен только на основе собственных данных по плотности и скорости звука без привлечения данных других авторов, ввиду их отсутствия.

Методика расчета опирается на простую зависимость удельного объема жидкости ( $v$ ) от давления:

$$v = \frac{1 + A(p + B)^{1/3}}{C + D(p + B)^{1/3}}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – параметры уравнения;  
 $p$  – давление, МПа.

Параметры уравнения (1) определяются следующими соотношениями:

$$A = a_0 + a_1 \tau, \quad (2)$$

$$B = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i (1 - \tau)^{n_i}, \quad (3)$$

$$C = c_0 + c_1 \tau, \quad (4)$$

$$D = d_0 + d_1 \tau, \quad (5)$$

где  $\tau$  – приведенная температура, ( $\tau = T/T_0$ );

$T$  и  $T_0$  – температура и опорная температура соответственно, К;

$a_0, a_1, b_0, b_i, c_0, c_1, d_0, d_1$  и  $n_i$  – коэффициенты аппроксимации.

Удельная изобарная теплоемкость при атмосферном давлении ( $c_{p0}$ ) определялась уравнением

$$c_{p0} = e_1 T', \quad (6)$$

где  $e_1$  – коэффициент аппроксимации.

Коэффициенты уравнений (2)–(6) вместе со значениями опорной температуры определялись минимизацией суммы квадратов относительных отклонений ( $S$ ):

$$S = \sum_{i=1}^{m_1} w_{1i} \left( \frac{v_i^{\text{эксп}} - v_i^{\text{расч}}}{v_i^{\text{расч}}} \right)^2 + \sum_{i=1}^{m_2} w_{2i} \left( \frac{W_i^{\text{эксп}} - W_i^{\text{расч}}}{W_i^{\text{расч}}} \right)^2, \quad (7)$$

где  $v_i^{\text{эксп}}$  и  $v_i^{\text{расч}}$  – экспериментальное и расчетное значения удельного объема, м<sup>3</sup>/кг;

$W_i^{\text{эксп}}$  и  $W_i^{\text{расч}}$  – экспериментальное и расчетное значения скорости звука, м/с;

$m_1$  и  $m_2$  – число экспериментальных значений удельного объема и скорости звука;

$w_{1i}$  и  $w_{2i}$  – статистические веса экспериментальных значений удельного объема и скорости звука.

Значения статистических весов  $w_{1i}$  и  $w_{2i}$  определялись как величины, обратные квадратам относительных неопределенностей экспериментальных данных по плотности и скорости звука.

Расчетные значения удельного объема для уравнения (7) определялись из уравнения (1), а скорости звука ( $W^{\text{расч}}$ ) из известного соотношения термодинамики [4]:

$$W^{\text{расч}} = \frac{v}{\left[ - \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T - \frac{T}{c_p} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]^{0.5}}, \quad (8)$$

где  $c_p$  – изобарная теплоемкость при расчетной температуре и давлении, значение которой определялось из известного соотношения термодинамики [4]:

$$c_p = c_{p0} - T \int_{p_0}^p \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p dp, \quad (9)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление.

Значения производных  $(\partial v / \partial p)_T$ ,  $(\partial v / \partial T)_p$  и интеграла  $\int_{p_0}^p (\partial^2 v / \partial T^2)_p dp$  в уравнениях (8) и (9) определялись путем дифференцирования и интегрирования уравнений (1)–(5).

После определения значений коэффициентов уравнений (2)–(6) величины изотермической сжимаемости ( $\beta_T$ ), изоэнтропной сжимаемости ( $\beta_S$ ), изохорной теплоемкости ( $c_v$ ) и изобарного коэффициента расширения ( $\alpha_p$ ) вычислялись с использованием следующих соотношений термодинамики [4]:

$$\beta_T = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T, \quad (10)$$

$$\beta_s = \frac{v}{W^2}, \quad (11)$$

$$c_p = c_p \frac{\beta_s}{\beta_T}, \quad (12)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p. \quad (13)$$

Точность рассчитанных термодинамических свойств оценивалась путем введения в исходные данные отклонений, равных их неопределенностям, и определения затем влияния этих отклонений на результаты расчетов. Относительная расширенная комбинированная неопределенность расчетных свойств,  $U_{c,r}(y)$ , определялась по уравнению

$$U_{c,r}(y) = \frac{k}{y} \left\{ [u(y)_\rho]^2 + [u(y)_W]^2 \right\}^{0.5} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где  $k$  – коэффициент охвата ( $k = 3$ );

$y$  – расчетное термодинамическое свойство;

$u(y)_\rho$  и  $u(y)_W$  – отклонения расчетного термодинамического свойства ( $y$ ), обусловленные внесением отклонений в значения исходных данных по плотности ( $\rho$ ) и скорости звука ( $W$ ), равные стандартным неопределенностям этих исходных данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате экспериментального исследования получены данные по плотности и скорости звука для гидравлического минерального масла МГЕ-46В и индустриального минерального масла И-20А производства ОАО «Нафтан» в широком диапазоне параметров состояния. Все измерения выполнены при давлениях до 100,1 МПа. Для масла МГЕ-46В плотность измерена при температурах 298,15–393,15 К, для масла И-20А при температурах 298,15–343,15 К. Измерения скорости звука выполнены в интервале температур 298,15–433,15 К. Результаты экспериментальных исследований плотности и скорости звука представлены в табл. 1–2.

**Табл. 1.** Экспериментальные данные по плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) минеральных масел МГЕ-46В и И-20А в зависимости от температуры  $T$  и давления  $p$

**Table 1.** Experimental density data of  $\rho$  (kg m<sup>-3</sup>) for mineral oils MGE-46V and I-20A as a function of temperature  $T$  and pressure  $p$

$p$ , МПа	$T$ , К								
	298,15	313,15	333,15	348,15	393,15	298,15	313,15	333,15	343,15
	МГЕ-46В					И-20А			
0,1	863,99	854,53	841,96	832,56		853,15	843,77	831,17	824,88
10,1					812,66				
20,1	874,60		854,18	845,56	820,12	863,88		843,54	837,75
40,1	884,04		864,84	856,78	833,20	873,41		854,29	848,89
60,1	892,57		874,36	866,73	844,55	882,03		863,89	858,75
80,1	900,38		883,00	875,72	854,66	889,90		872,57	867,68
100,1	907,59		890,94	883,95	863,77	897,17		880,55	875,86

Примечание – Относительная расширенная неопределенность плотности, при вероятности охвата 0,99, составляет 0,03 %

**Табл. 2.** Экспериментальные данные по скорости звука  $W$  (м/с) для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А в зависимости от температуры  $T$  и давления  $p$

**Table 2.** Experimental density data of  $W$  (m s<sup>-1</sup>) for mineral oils MGE-46V and I-20A as a function of temperature  $T$  and pressure  $p$

$p$ , МПа	$T$ , К									
	298,15	333,15	348,15	393,15	433,15	298,15	333,15	343,15	393,15	433,15
	МГЕ-46В					И-20А				
0,1	1444,2	1324,4	1276,2			1436,7	1315,7	1283,8	1129,2	
10,1				1199,0	1099,4				1193,4	1091,2
20,1	1536,7	1425,7	1381,9	1256,1	1161,8	1529,7	1418,5	1389,6	1251,4	1155,1
40,1	1618,4	1513,9	1473,1	1357,0	1270,6	1612,8	1507,5	1480,3	1353,4	1265,5
60,1		1592,1	1553,7	1444,8	1365,0		1586,6	1560,7	1442,1	1360,2
80,1			1626,6	1523,2	1447,8		1658,0	1633,5	1521,3	1443,7
100,1			1692,0	1594,7	1523,4		1710,9	1699,4	1593,2	1519,1

Примечание – Относительная расширенная неопределенность скорости звука, при вероятности охвата 0,99, составляет 0,1 %

Минимизацией суммы квадратов отклонений (7) исходных данных от расчетных величин были получены значения параметров уравнений (2)–(6), представленные в табл. 3 вместе с величинами опорных температур для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А.

**Табл. 3.** Значения коэффициентов уравнений (2)–(6) и опорных температур для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А

**Table 3.** Coefficients of equations (2)–(6) and reference temperatures for mineral oils MGE-46V and I-20A

Коэффициент	МГЕ-46В	И-20А
$a_0$	-0,025648	-0,037144
$a_1$	0,033784	0,044882
$b_0$	44,81	43,01
$b_1$	629	196,2
$b_2$	-537	0
$b_3$	111,45	111,6
$c_0$	876,87	882,02
$c_1$	-246,4	-259,56
$d_0$	-1,708	-14,182
$d_1$	49,612	61,427
$n_1$	2,8	2,5
$n_2$	3,3	0
$n_3$	1	1
$T_0$	435	435
$e_1$	6,03	6,102

С использованием значений коэффициентов, представленных в табл. 3, по уравнениям (1)–(6) и (8)–(13) были вычислены взаимосогласованные величины термодинамических свойств гидравлического минерального масла МГЕ-46В и промышленного минерального масла И-20А производства ОАО «Нафтан». Расчет выполнен в диапазоне давлений 0,1–100 МПа в экспериментально исследованных интервалах температур 298,15–433,15 К.

Расчетные значения плотности, скорости звука, изобарной и изохорной теплоемкостей, изотермической и изоэнтропной сжимаемости, изобарного коэффициента расширения представлены в табл. 4 и 5.

Выполненная при помощи уравнения (14) оценка точности результатов расчета показала следующие значения относительных расширенных неопределенностей с вероятностью охвата 0,99 для обоих исследованных веществ: плотности – 0,03 %, скорости звука – 0,1 %, изоэнтропного коэффициента сжимаемости – 0,2 %, изобарного коэффициента расширения и изотермического коэффициента сжимаемости – 0,3 %, изобарной и изохорной теплоемкости – 6 %.

Табл. 4. Расчетные термодинамические свойства минерального масла МГЕ-46В

Table 4. Derived thermodynamic properties for mineral oil MGE-46V

$T$	$\rho$	$W$	$c_p$	$c_v$	$\alpha_p \cdot 10^6$	$\beta_T$	$\beta_S$	$T$	$\rho$	$W$	$c_p$	$c_v$	$\alpha_p \cdot 10^6$	$\beta_T$	$\beta_S$
К	кг/м <sup>3</sup>	м/с	кДж/(кг·К)		К <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>	К	кг/м <sup>3</sup>	м/с	кДж/(кг·К)		К <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>
$p = 0,1$ МПа								$p = 60$ МПа							
298,15	863,97	1444,9	1,80	1,52	726	656	554	298,15	892,51	1690,1	1,78	1,53	589	457	392
313,15	854,55	1393,0	1,89	1,61	736	708	603	313,15	884,66	1647,6	1,88	1,62	589	482	416
333,15	841,96	1325,0	2,01	1,73	747	787	677	333,15	874,32	1592,5	2,00	1,74	586	517	451
353,15	829,39	1259,1	2,13	1,85	757	875	761	353,15	864,17	1539,9	2,12	1,87	581	553	488
$p = 10$ МПа								373,15	854,23	1490,4	2,24	2,00	575	592	527
298,15	869,40	1491,7	1,79	1,52	696	609	517	393,15	844,51	1444,5	2,36	2,12	569	632	568
313,15	860,32	1441,9	1,88	1,61	703	654	559	413,15	834,98	1402,3	2,47	2,23	566	673	609
333,15	848,25	1377,0	2,01	1,73	710	720	622	433,15	825,57	1364,5	2,56	2,32	570	717	651
353,15	836,25	1314,4	2,13	1,85	715	794	692	$p = 80$ МПа							
373,15	824,36	1254,8	2,25	1,98	718	874	770	298,15	900,35	1757,1	1,78	1,53	560	418	360
393,15	812,59	1198,8	2,37	2,10	721	963	856	313,15	892,82	1716,4	1,87	1,62	558	439	380
413,15	800,90	1146,6	2,48	2,23	729	1060	950	333,15	882,95	1663,8	2,00	1,75	554	467	409
433,15	789,18	1098,3	2,60	2,33	749	1169	1050	353,15	873,27	1613,7	2,12	1,88	548	497	440
$p = 20$ МПа								373,15	863,82	1566,6	2,24	2,00	540	528	472
298,15	874,53	1535,9	1,79	1,52	669	570	485	393,15	854,60	1522,9	2,36	2,13	533	560	505
313,15	865,77	1488,0	1,88	1,61	674	609	522	413,15	845,58	1483,0	2,47	2,24	528	593	538
333,15	854,14	1425,7	2,00	1,73	678	665	576	433,15	836,70	1447,4	2,55	2,32	530	627	570
353,15	842,63	1365,8	2,12	1,86	679	727	636	$p = 100$ МПа							
373,15	831,26	1309,0	2,24	1,98	679	794	702	298,15	907,61	1819,0	1,78	1,54	536	386	333
393,15	820,04	1255,8	2,36	2,11	679	867	773	313,15	900,36	1779,8	1,87	1,63	533	403	351
413,15	808,95	1206,5	2,48	2,23	683	945	849	333,15	890,87	1729,3	2,00	1,75	527	427	375
433,15	797,88	1161,3	2,59	2,33	698	1031	929	353,15	881,59	1681,2	2,12	1,88	520	452	401
$p = 40$ МПа								373,15	872,54	1636,0	2,24	2,01	512	478	428
298,15	883,97	1616,9	1,79	1,53	625	506	433	393,15	863,73	1594,2	2,36	2,13	504	504	456
313,15	875,71	1572,1	1,88	1,62	626	537	462	413,15	855,13	1556,0	2,47	2,24	498	532	483
333,15	864,81	1513,9	2,00	1,74	626	580	505	433,15	846,67	1522,2	2,55	2,32	498	560	510
353,15	854,06	1458,1	2,12	1,86	624	627	551								
373,15	843,51	1405,6	2,24	1,99	620	676	600								
393,15	833,15	1356,6	2,36	2,11	616	728	652								
413,15	822,96	1311,5	2,47	2,23	615	783	706								
433,15	812,85	1270,7	2,57	2,33	623	842	762								

Табл. 5. Расчетные термодинамические свойства минерального масла И-20А

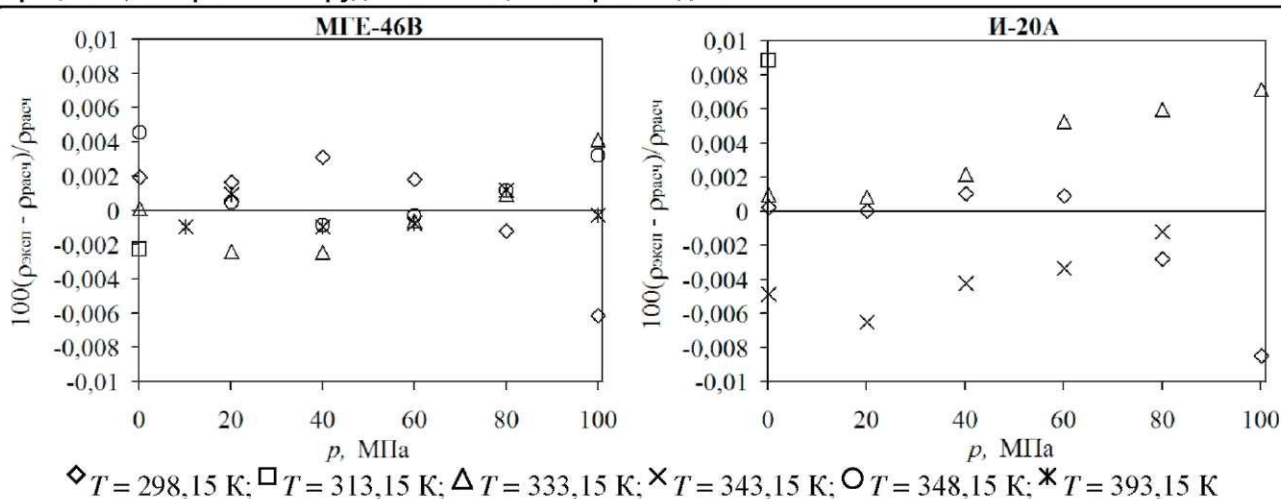
Table 5. Derived thermodynamic properties for mineral oil I-20A

$T$	$\rho$	$W$	$c_p$	$c_v$	$\alpha_p \cdot 10^6$	$\beta_T$	$\beta_S$	$T$	$\rho$	$W$	$c_p$	$c_v$	$\alpha_p \cdot 10^6$	$\beta_T$	$\beta_S$
К	кг/м <sup>3</sup>	м/с	кДж/(кг·К)		К <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>		К	кг/м <sup>3</sup>	м/с	кДж/(кг·К)		К <sup>-1</sup>	ТПа <sup>-1</sup>	
$p = 0,1$ МПа								$p = 60$ МПа							
298,15	853,14	1437,2	1,82	1,54	740	673	567	298,15	881,98	1684,4	1,81	1,55	601	467	400
313,15	843,70	1384,1	1,91	1,63	745	726	619	313,15	874,10	1641,3	1,90	1,64	596	492	425
333,15	831,16	1316,0	2,03	1,75	752	806	695	333,15	863,80	1586,6	2,02	1,77	590	526	460
353,15	818,68	1250,9	2,15	1,88	761	897	781	353,15	853,72	1535,1	2,14	1,89	584	563	497
373,15	806,23	1188,8	2,28	2,00	772	999	878	373,15	843,86	1486,8	2,26	2,02	578	601	536
393,15	793,78	1129,5	2,40	2,12	786	1115	987	393,15	834,19	1441,5	2,38	2,14	574	642	577
$p = 10$ МПа								413,15	824,68	1399,2	2,49	2,25	573	685	619
298,15	858,63	1484,6	1,82	1,54	708	624	528	433,15	815,26	1360,0	2,59	2,35	577	731	663
313,15	849,54	1433,9	1,91	1,63	711	670	573	$p = 80$ МПа							
333,15	837,53	1369,0	2,03	1,75	714	737	637	298,15	889,88	1751,3	1,81	1,56	571	427	366
353,15	825,62	1307,2	2,15	1,88	718	811	709	313,15	882,33	1710,2	1,90	1,65	565	447	388
373,15	813,80	1248,6	2,27	2,00	724	894	788	333,15	872,48	1658,1	2,02	1,77	557	476	417
393,15	802,05	1193,0	2,39	2,13	732	986	876	353,15	862,87	1609,2	2,14	1,90	550	505	448
413,15	790,30	1140,3	2,51	2,25	745	1089	973	373,15	853,49	1563,3	2,26	2,02	543	536	479
433,15	778,45	1090,3	2,63	2,36	768	1206	1081	393,15	844,33	1520,4	2,38	2,14	537	569	512
$p = 20$ МПа								413,15	835,34	1480,4	2,49	2,26	534	603	546
298,15	863,83	1529,4	1,81	1,54	681	583	495	433,15	826,47	1443,5	2,58	2,35	535	639	581
313,15	855,05	1480,6	1,91	1,63	681	623	533	$p = 100$ МПа							
333,15	843,47	1418,4	2,03	1,76	682	680	589	298,15	897,21	1812,8	1,81	1,56	547	394	339
353,15	832,05	1359,4	2,15	1,88	682	742	650	313,15	889,92	1773,5	1,90	1,65	540	411	357
373,15	820,76	1303,6	2,27	2,01	684	811	717	333,15	880,45	1723,6	2,02	1,78	531	435	382
393,15	809,57	1250,9	2,39	2,13	688	886	789	353,15	871,22	1676,8	2,15	1,90	522	460	408
413,15	798,45	1201,2	2,51	2,25	696	968	868	373,15	862,24	1632,9	2,26	2,03	514	485	435
433,15	787,29	1154,4	2,62	2,35	713	1060	953	393,15	853,49	1591,9	2,38	2,15	507	512	462
$p = 40$ МПа								413,15	844,92	1553,8	2,49	2,26	502	540	490
298,15	873,36	1611,1	1,81	1,55	636	517	441	433,15	836,48	1518,7	2,58	2,35	502	569	518
313,15	865,08	1565,5	1,90	1,64	633	548	472								
333,15	854,22	1507,5	2,02	1,76	630	591	515								
353,15	843,56	1452,8	2,15	1,89	626	638	562								
373,15	833,09	1401,3	2,27	2,01	624	688	611								
393,15	822,77	1352,9	2,38	2,13	623	742	664								
413,15	812,58	1307,6	2,50	2,25	625	799	720								
433,15	802,44	1265,3	2,60	2,35	633	862	778								

На рис. 1–2 представлены отклонения экспериментальных значений плотности и скорости звука от вычисленных с использованием уравнений (1)–(6) и (8), (9) для двух исследованных масел (МГЕ-46В и И-20А).

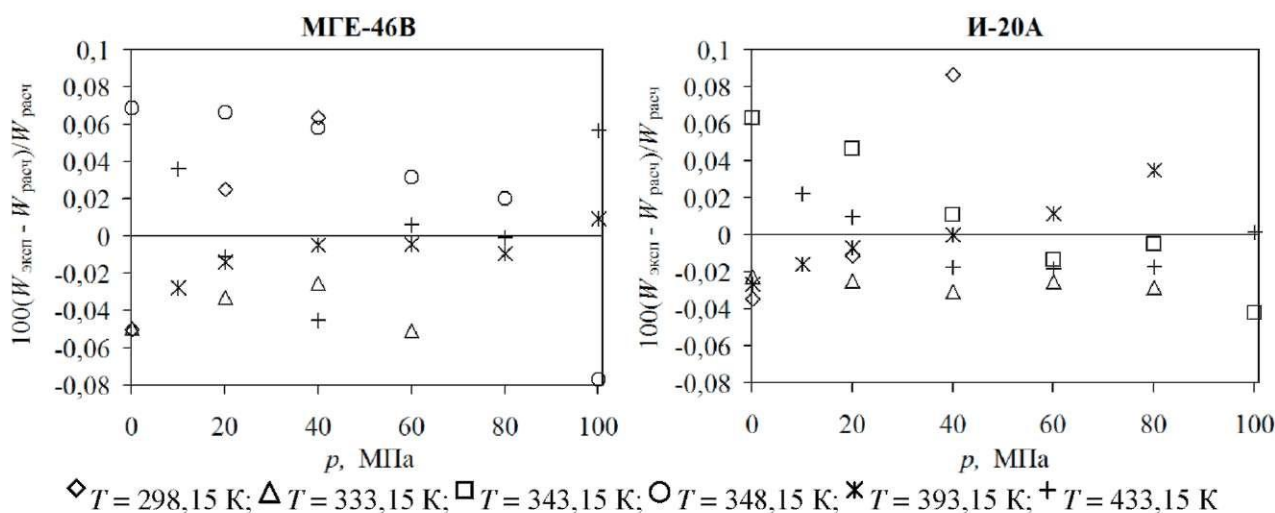
Как видно из рисунков максимальные отклонения плотности для масел МГЕ-46В и И-20А составляют 0,006 % и 0,009 % соответственно, скорости звука 0,08 % и 0,09 % соответственно.





**Рис. 1.** Относительные отклонения данных по плотности от значений, полученных с использованием уравнений (1)–(5) для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А

**Fig. 1.** Percentage deviations of density data from the values obtained from equations (1)–(5) for mineral oils MGE-46V and I-20A



**Рис. 2.** Относительные отклонения данных по скорости звука от значений, полученных с использованием уравнений (1)–(6) и (8), (9) для минеральных масел МГЕ-46В и И-20А

**Fig. 2.** Percentage deviations of speed of sound data from the values obtained from equations (1)–(6) and (8), (9) for mineral oils MGE-46V and I-20A

Отклонения экспериментальных данных от расчетных величин не носят ярко выраженного систематического характера, достаточно равномерно распределены вокруг нулевого значения и нигде не превышают относительных расширенных комбинированных неопределенностей измерения плотности и скорости звука. Такое распределение и величины отклонений указывают на надежность предложенной методики расчета и правильность оценки точности экспериментальных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального исследования впервые получены данные по плотности и скорости звука для гидравлического минерального масла МГЕ-46В и индустриального минерального масла И-20А производства ОАО «Нафтан» в широком диапазоне параметров состояния.

Предложена методика расчета термодинамических свойств минеральных масел на основе экспериментальных данных по плотности и скорости звука без привлечения других исходных данных. В результате выполненных расчетов показана работоспособность предложенной методики расчета и получен комплекс взаимосогласованных расчетных значений термодинамических свойств минеральных масел МГЕ-46В и И-20А, включающий значения плотности, скорости звука, изобарной и изохорной теплоемкостей, изотермической и изоэнтропной сжимаемости, изобарного коэффициента расширения.

Получены эмпирические уравнения для описания вышеперечисленных термодинамических свойств в широком диапазоне параметров состояния. Показано хорошее согласование расчетных и экспериментальных величин плотности и скорости звука.

Полученные значения термодинамических свойств и обобщающие их уравнения могут быть использованы при расчете, проектировании и моделировании оборудования, в котором используются минеральные масла МГЕ-46В и И-20А.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Papke, V. L. Mineral Oil Base Fluids / V. L. Papke // Encyclopedia of Tribology / eds. Q. J. Wang, Y. W. Chung. – Springer, Boston, MA., 2013. – P. 2257–2261.
- 2 Khasanshin, T. S. Liquid density measurements of cumene, tert-butylbenzene, and hexadecane over wide ranges of temperature and pressure / T. S. Khasanshin et al // Fluid Phase Equilib. – 2018. – Vol. 463. – No 15. – P. 121–127.
- 3 Хасаншин, Т. С. Скорость звука в н-гексане, н-октане, н-декане и н-гексадекане в жидком состоянии / Т. С. Хасаншин, В. С. Самуйлов, А. П. Щемелев // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 4. – С. 732–736.
- 4 Сычѳв В. В. Дифференциальные уравнения термодинамики / В. В. Сычѳв. – 3-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 252 с.

*Поступила в редакцию 02.01.2020 г.*

## ОБ АВТОРАХ:

**Александр Петрович Щемелѳв**, кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательским сектором, Могилевский государственный университет продовольствия, e-mail: shche70@mail.ru.

**Владимир Сергеевич Самуйлов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплохладотехники, Могилевский государственный университет продовольствия. e-mail: samuilov\_vlad@tut.by.

**Надежда Владимировна Голубева**, старший преподаватель кафедры теплохладотехники, Могилевский государственный университет продовольствия. e-mail: vandnstar@yandex.by.

**Олег Георгиевич Поддубский**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплохладотехники, Могилевский государственный университет продовольствия. e-mail: poddubskij@tut.by.

## ABOUT AUTHORS:

**Alexander P. Shchamialiou**, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Research Department, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: shche70@mail.ru.

**Vladimir S. Samuilov**, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Refrigerating Engineering, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: samuilov\_vlad@tut.by.

**Nadejda V. Holubeva**, Senior Lecturer of the Department of the Heat and Refrigerating Engineering, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: vandnstar@yandex.by.

**Alch G. Paddubski**, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Heat and Refrigerating Engineering, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: poddubskij@tut.by.