

14. Becker W. The turbomolecular pump, its design, operation and theory; calculation of the pumping speed for various gases and their dependence on the forepump //Vacuum. – 1966. – Т. 16. – №. 11. – С. 625-632.
15. Демихов К. Е., Очков А. А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – №. 5 (110).

## **Вязкость и плотность минеральных вакуумных масел**

*Д.И.Саздеев, М.Г.Фомина, В.А.Аляев, Ф.М.Гумеров, \*И.М.Абдулагатов*  
*Казань, КНИТУ, ул. Карла Маркса, 68, E-mail: sagdeev@mail.ru*  
*\*Махачкала, ДГУ, ул. Гаджиева, 43-а, E-mail: ilmutdina@gmail.com*

*Исследованы коэффициенты динамической вязкости и плотность восьми вакуумных масел, относящихся по принятой классификации к минеральным вакуумным маслам нефтяного происхождения (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1С, VM-8, VM-9)*

*Viscosity and density of mineral vacuum oils. D.I.Sagdeev, M.G.Fomina, V.A.Alyayev, F.M.Gumerov, I.M.Abdulagatov. Coefficients of dynamic viscosity and density of eight vacuum oils are investigated. These oils are related to mineral vacuum oils of oil origin (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1S, VM-8, VM-9) according to the accepted classification.*

В настоящее время в вакуумной технике нашли широкое применение вакуумные рабочие жидкости (ВРЖ) различного происхождения, представляющие собой сложные смеси. В связи с этим экспериментальное исследование физико-химических свойств ВРЖ является актуальной практической задачей. Обзор существующих вакуумных рабочих жидкостей и их полная характеристика с приведением теплофизических и физико-химических свойств полностью приведен в работах [1-3].

По химической природе вакуумные рабочие жидкости подразделяются на минеральные (продукты глубокой переработки нефти) и синтетические (силиконовые жидкости, полифениловые эфиры, агрессивно-стойкие жидкости, жидкости на основе углеродсодержащих органических соединений).

По своему предназначению они подразделяются на следующие группы: для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением, для пароструйных диффузионных и бустерных насосов, для турбомолекулярных насосов.

Нами были исследованы коэффициенты динамической вязкости и плотность восьми ВРЖ, относящихся по принятой классификации к минеральным вакуумным маслам нефтяного происхождения (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1С, VM-8, VM-9) [4]. Характеристика исследованных минеральных вакуумных масел представлена в таблице 1.

Исследование вязкости и плотности вышеприведенных вакуумных масел при атмосферном давлении в интервале изменения температур от 298 К до 473 К было проведено на экспериментальной установке для совместного измерения коэффициента динамической вязкости и плотности [5-10]. Измерение коэффициента динамической вязкости проводилось методом падающего груза в относительном варианте, а измерение плотности - методом гидростатического взвешивания.

Таблица 1. Характеристика минеральных вакуумных масел при T=293,15 К и атмосферном давлении.

№ n/n	Наименование образца	Технические условия	Плотность $\rho_4^{20}$ кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\nu_{20} \cdot 10^6$ м <sup>2</sup> /с	Показатель преломления** $n_D^{20}$	Месторождение нефти
1	ВМ-1	ГОСТ 23013-78	883,74	417,03	1,4836	Бакинское
2	ВМ-1И	ГОСТ 23013-78	891,81	369,76	—	Туркменское
3	ВМ-3	ГОСТ 23013-78	879,88	30,524	1,4830	Бакинское
4	ВМ-5	ГОСТ 23013-78	883,07	424,48	—	Бакинское
5	ВМ-6	ГОСТ 23013-78	884,42	168,63	—	Бакинское
6	ВМ-8	ТУ 38.410451-83	864,17*	304,22*	1,4779	Зап. сибирское
7	ВМ-9	ТУ 38.401561-86	861,92*	285,78*	1,4754	Зап. сибирское
8	ВМ-1С	ТУ 38.401561-86	858,18*	130,76*	1,4745	Зап. сибирское

\* – измерения производились при температуре T=298,15 К,

\*\* – измерения производились на рефрактометре марки ИРФ-23.

### Основное выражение для расчета плотности методом гидростатического взвешивания

На экспериментальной установке, представленной в работе [4], для измерения плотности жидкостей использован метод гидростатического взвешивания. Измерения проведены при температурах от 293 К до 473 К при атмосферном давлении и рассчитаны по основному расчетному выражению

$$\rho_T = \frac{m - m_3 - (m_2 - m_1) - \rho_{T_0}^C \cdot (V_{T_0}^C + 0,5V_T^H)}{V_T^n + 0,5 \cdot V_T^H} \quad (1)$$

где  $m$  – масса подвесной системы, приведенная к пустоте;  $m_1$  – масса соленоида без подвесной системы;  $m_2$  – масса соленоида с подвесной системой;  $m_3$  – поправка на магнитные свойства окружающей среды и упругость подводящих проводов соленоида и датчика;  $\rho_{T_0}^C$  – плотность исследуемой жидкости в зоне сердечника при  $T_0=293$  К.

### Основное выражение для расчета коэффициента динамической вязкости методом падающего груза

Измерение времени падения грузов и слежение за положением груза при проведении эксперимента осуществлялось электронно-следающей системой.

Уравнение для расчета  $\eta_T$  в широкой области изменения температур было получено на основе метода обобщенных переменных (метод анализа размерностей) в виде:

$$\eta_T = \exp A_T \quad (2)$$

где

$$A_T = [-a_0 + \ln W_T + (1 - a_2) \cdot \ln \delta_T + a_2 \cdot \ln D_T + (1 + a_1) \cdot \ln \rho_T + a_1 \cdot \ln G_T] \cdot (2a_1 + 1)^{-1},$$

$W_T$  – скорость падения груза;  $\delta_T = D_T - d_T$  – кольцевой зазор;  $G_T$  – приведенный вес груза;  $D_T$  – внутренний диаметр трубки;  $\rho_T$  – плотность исследуемой жидкости при параметрах опыта. Постоянные  $a_0, a_1, a_2$  были определены калибровкой и оказались равными  $a_0 = -3.2505$ ,  $a_1 = -0.9981$ ,  $a_2 = 3.9696$ .

Влияние температуры на геометрические размеры элементов систем измерения вязкости и плотности учитывалось введением поправок.

Расчёт неопределённости результатов измерения коэффициента динамической вязкости ( $\eta_{ж_t}$ ) и плотности ( $\rho_{ж_t}$ ) проведен в соответствии с рекомендациями по выражению неопределённости измерений ГОСТ Р 54500.3-2011 [11, 12], область применения которых включает проведение фундаментальных и прикладных исследований и разработок в науке и технике. Так, расширенная неопределённость при 95% уровне доверия составила для результатов измерения: плотности  $\pm 0,17\%$ ; коэффициентов динамической вязкости  $\pm 1,5\%$ . Приведённые значения являются максимальными и получены для наихудших условий проведения эксперимента.

### Результаты экспериментальных исследований

Результаты обработки экспериментальных исследований коэффициентов динамической вязкости и плотности при атмосферном давлении приведены в табл.2. и табл.3.

Для точного представления измеренной плотности исследованных образцов вакуумных масел при атмосферном давлении была использована квадратичная функция

$$\rho(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2. \quad (3)$$

Результаты аппроксимации измерений плотности образцов вакуумных масел представлены в таблице.2. Расхождения в среднем не превышают  $\pm 0,5\%$ , что лежит в пределах суммарной ошибки измерений.

Таблица 2. Результаты аппроксимации измерения плотности минеральных вакуумных масел.

Марка вакуумного масла	Коэффициенты уравнения (3)			
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$
ВМ-1	$1,07575 \cdot 10^3$	$-6,77167 \cdot 10^{-1}$	$7,66622 \cdot 10^{-5}$	$9,99978 \cdot 10^{-1}$
ВМ-1И	$1,07801 \cdot 10^3$	$-6,40606 \cdot 10^{-1}$	$2,28887 \cdot 10^{-5}$	$9,99953 \cdot 10^{-1}$
ВМ-3	$1,06344 \cdot 10^3$	$-6,01172 \cdot 10^{-1}$	$-8,96359 \cdot 10^{-5}$	$9,99978 \cdot 10^{-1}$
ВМ-5	$1,05540 \cdot 10^3$	$-5,71173 \cdot 10^{-1}$	$-5,80864 \cdot 10^{-5}$	$9,99989 \cdot 10^{-1}$
ВМ-6	$1,06429 \cdot 10^3$	$-6,01010 \cdot 10^{-1}$	$-4,64396 \cdot 10^{-5}$	$9,99960 \cdot 10^{-1}$
ВМ-8	$9,62772 \cdot 10^2$	$-1,46490 \cdot 10^{-1}$	$-6,29957 \cdot 10^{-4}$	$9,98313 \cdot 10^{-1}$
ВМ-9	$9,93271 \cdot 10^2$	$-3,38073 \cdot 10^{-1}$	$-3,54858 \cdot 10^{-4}$	$9,98296 \cdot 10^{-1}$
ВМ-1С	$8,27229 \cdot 10^2$	$5,18531 \cdot 10^{-1}$	$-1,44456 \cdot 10^{-3}$	$9,96030 \cdot 10^{-1}$

Температурную зависимость вязкости можно представить с помощью известного уравнения типа Аррениуса-Андраде, которое изменено для расширения температурного диапазона [10-16]

$$\eta(T) = b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1}{T_r}\right) \text{ или } \ln \eta(T) = \ln b_0 + \left(\frac{b_1}{T_r}\right), \quad (4)$$

где  $T_r = T/100$ ,  $b_0$  – коэффициент, соответствующий вязкости  $\eta = \eta_\infty$  при высокотемпературном пределе ( $T \rightarrow \infty$ ),  $b_1 = \varepsilon_a/R$  и  $\varepsilon_a = \Delta H$  – энергия активации потока (энтальпия активации), где  $T$  – температура, К. Выражение (4) теоретически подтверждается теорией абсолютных скоростей Эйринга-Гласстона и др. [12]. Это уравнение успешно использовалось ранее для представления экспериментальных данных о вязкости для водных растворов [14–18] и ионных жидкостей [19]. Как видно из уравнения (4), энтальпия активации может быть непосредственно рассчитана с использованием экспериментальных данных вязкости по наклону прямой линии.

Для некоторых жидкостей и жидких смесей экспериментальная кривая  $\ln \eta = f(T_r^{-1})$  не является прямой линией при высоких температурах, что хорошо показано в работах [19, 20], и соотношение Аррениуса-Андраде (4) может быть слегка изменено для расширения температурного диапазона

$$\eta(T) = b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1}{T_r} + \frac{b_2}{T_r^2}\right) \text{ или } \ln \eta(T) = \ln b_0 + \frac{b_1}{T_r} + \frac{b_2}{T_r^2}, \quad (5)$$

Для удобства аппроксимации используем модифицированное уравнение для расчета коэффициента динамической вязкости, которое после логарифмирования примет вид

$$\ln \eta(T_r) = b_0 + b_1 \cdot T_r + b_2 \cdot T_r^2 + b_3 \cdot T_r^3 + b_4 \cdot T_r^4 + b_5 \cdot T_r^5 \quad (6)$$

Результаты измерений коэффициента динамической вязкости минеральных вакуумных масел были обработаны полиномами пятой степени относительно  $T_r$ , коэффициенты которых приведены в таблице. 3.

Расхождения в среднем не превышают  $\pm 3\%$ , что лежит в пределах суммарной ошибки измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-19-00478).

Таблица 3. Результаты аппроксимации измерений вязкости минеральных вакуумных масел.

Марка вакуумного масла	Коэффициенты уравнения (6)						
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$R^2$
ВМ-1	$1,706 \cdot 10^2$	$-1,660 \cdot 10^2$	$6,852 \cdot 10^1$	$-1,474 \cdot 10^1$	$1,632 \cdot 10^0$	$-7,371 \cdot 10^{-2}$	0,99
ВМ-1И	$1,651 \cdot 10^2$	$-1,605 \cdot 10^2$	$6,630 \cdot 10^1$	$-1,428 \cdot 10^1$	$1,585 \cdot 10^0$	$-7,173 \cdot 10^{-2}$	1,00
ВМ-3	$4,097 \cdot 10^2$	$-4,981 \cdot 10^2$	$2,467 \cdot 10^2$	$-6,166 \cdot 10^1$	$7,728 \cdot 10^0$	$-3,874 \cdot 10^{-1}$	0,99
ВМ-5	$1,695 \cdot 10^2$	$-1,638 \cdot 10^2$	$6,712 \cdot 10^1$	$-1,433 \cdot 10^1$	$1,574 \cdot 10^0$	$-7,055 \cdot 10^{-2}$	1,00
ВМ-6	$1,537 \cdot 10^2$	$-1,495 \cdot 10^2$	$6,144 \cdot 10^1$	$-1,314 \cdot 10^1$	$1,446 \cdot 10^0$	$-6,491 \cdot 10^{-2}$	1,00
ВМ-8	$-5,100 \cdot 10^2$	$7,048 \cdot 10^2$	$-3,757 \cdot 10^2$	$9,820 \cdot 10^1$	$-1,267 \cdot 10^1$	$-6,477 \cdot 10^{-1}$	0,99
ВМ-9	$-5,392 \cdot 10^2$	$7,446 \cdot 10^2$	$-3,967 \cdot 10^2$	$1,036 \cdot 10^2$	$-1,334 \cdot 10^1$	$6,811 \cdot 10^{-1}$	0,99
ВМ-1С	$1,836 \cdot 10^2$	$-1,907 \cdot 10^2$	$8,364 \cdot 10^1$	$-1,900 \cdot 10^1$	$2,209 \cdot 10^0$	$-1,041 \cdot 10^{-1}$	0,99

### Литература

- Амосова Л.М., Цейтлин А.Б., Ширяев А.Т. Рабочие жидкости для вакуумных насосов. М.: ЦИНТИхимнефтемаш (ХМ-6), 1989. 28 с.
- Шагиахметов Р.А. Рабочие жидкости вакуумных насосов. // Вакуумная техника и технология. 1993. т.3. №3, 4. С. 59-62.
- Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.
- Сагдеев.Д.И., Борисов В.Б., Путиловский Ф.Д., Мухамедзянов Г.Х. Вакуумные масла. Плотность и коэффициент динамической вязкости. ГСССД Р 258-87. Рекомендуемые справочные данные. 18 декабря 1987. 17 с.
- Sagdeev D.I., Fomina M.G., Alayev V.A., Musin R.Z., Abdulagatov I.M. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. J. Chem. Eng. Data, 2018, v.63, p.1698-1705.
- Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of polyethylene glycols and their mixtures at temperatures from 293 K to 473 K and at atmospheric pressure. J. Chem. Thermodynamics, 2011, v.43, №12, p.1824-1843.
- Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of n-heptane at temperatures from 298 K to 470 K and pressure up to 245 MPa. Int. J. Thermophys., 2013, v.34, №1, p.1-33.
- ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения. 2012.
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO: Geneva, Switzerland, 1993, (ISBN 92-67-10188-9).
- M. Schmidt, H. Lipson (2012), Eureka Formulize (Version 0.97) [Computer software]. Nutonian Inc., Cambridge, MA. Retrieved 14 June 2012. <http://www.nutonian.com/>

11. Tomida D, Kenmochi S, Tsukada T, Qiao K, Bao O, Yokoyama C. Viscosity and thermal conductivity of 1-hexyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate and 1-octyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate at pressures up to 20 MPa. *Int. J. Thermophys.* 2012; 33: 959 -969.
12. S. Glasstone, K. Laidler, E. Eyring, *Theory of Rate Processes* (McGraw-Hill, New York, 1941).
13. R.H. Stokes, R. Mills, *Viscosity of Electrolytes and Related Properties* (Pergamon Press, New York, 1965).
14. T. Erday-Gruz, *Transport Phenomena in Aqueous Solutions* (John Wiley & Sons Inc., New York, 1974).
15. Abdulgatov IM, Azizov ND. Densities, apparent molar volumes, and viscosities of concentrated aqueous NaNO<sub>3</sub> solutions at temperatures from 298 to 607 K and at pressures up to 30 MPa, *J. Sol. Chem.* 2005; 34: 645-685.
16. Abdulgatov IM, Azizov ND. Viscosity of aqueous calcium chloride solutions at high temperatures and high pressures. *Fluid Phase Equilib.* 2006; 240: 204-219.
17. I Abdulgatov IM, Azizov ND. Viscosity of aqueous LiI solutions at 293 - 525 K and 0.1-40 MPa. *Thermochimica Acta* 2005; 439: 8 -20.
18. Abdulgatov IM, Zeinalova AB, Azizov ND. Viscosity of aqueous Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> solutions at temperatures from (297 to 475) K and at pressures up to 30 MPa and concentration between (0.050 and 2.246) mol·kg<sup>-1</sup>. *J. Chem. Thermodyn.* 2006; 38: 179-189..
19. Grimes CE, Kestin J, Khalifa HE. Viscosity of aqueous KCl solutions in the temperature range 25-150 °C and the pressure range 0-30 MPa. *J. Chem. Eng. Data* 1979; 24: 121-126.
20. J. Kestin J, Shankland IR. Viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 25-200 °C and in the pressure range 0.1-30 MPa. *Int. J. Thermophys.* 198; 5: 241-263.

## **Исследование газовыделения магнитореологического эластомера**

*И.А. Ефимов, \*Д.А. Иванова, \*\*А.П. Ротарь, \*\*\*А.М.Базиненков*  
*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5; dj3dmark@gmail.com,*  
*\*Ivanova\_D\_A@bk.ru, \*\*anastasia.rotari15@gmail.com, \*\*\*ambazinenkov@bmstu.ru*

*Магнитореологический эластомер является перспективным композиционный интеллектуальным материалом для механизмов точных перемещений и виброизоляции объектов, в том числе и в условиях вакуума, за счет его способности быстро и обратимо менять свои вязко-упруго-пластические свойства при приложении внешнего магнитного поля.*

*В работе представлено исследование газовыделения магнитореологического эластомера. Разработана испытательная вакуумная камера для исследуемых образцов. Получены графики изменения давления в камере во время процесса обезгаживания. Получены данные о парциальном составе выделяющихся газов. Установлено, что большинство из них входит в состав атмосферы, однако помимо них присутствуют другие, не учтенные газы.*

*Exploration of gas emission of magneto-rheological elastomer. I.A.Efimov, D.A.Ivanova, A.P.Rotar, A.M.Bazinenkov. Magneto-rheological elastomer (MRE) is the perspective smart composite material. It is used in precision positioning and vibration control systems.*

*The article describes research of gas emission of MRE. Experimental vacuum vessel was designed. Graphs of pressure changes in vessel and partial composition of evolving gases were obtained.*

Магнитореологический эластомер (МРЭ), относящийся к классу «Smartmaterials» (интеллектуальные материалы), представляет собой управляемый композиционный материал. В его состав входит эластичная полимерная матрица (например,