

Исследование теплофизических свойств магнитных жидкостей

Д. С. ДЖУРАЕВ¹, М. М. САФАРОВ²

¹ Политехнический институт Таджикского технического университета им. ак. М.С. Осими, Худжанд, Таджикистан, e-mail: djuraev@mail.ru

² Душанбинский филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», Душанбе, Таджикистан, e-mail: mahmad1@list.ru

Исследованы теплофизические свойства (температуропроводность, теплопроводность и теплоёмкость) магнитных жидкостей методом лазерной вспышки в интервале индукции магнитного поля $1,594\text{—}3,866 \cdot 10^{-2}$ мТл в зависимости от добавки 0,1—0,3 г железного порошка при комнатной температуре.

Ключевые слова: магнитная жидкость, температуропроводность, теплопроводность, теплоёмкость, магнитное поле.

Investigated the thermophysical properties (thermal diffusivity, conductivity and heat capacity) of magnetic liquids fluids by laser flash within the definite interval of magnetic field induction in mTl depending on additives of 0,1—0,3 g of iron powder at room temperature.

Key words: magnetic liquid, thermal diffusivity, thermal conductivity, heat capacity, magnetic field.

Магнитные жидкости широко применяют в различных областях современной науки и техники, биологии и медицины, машиностроении, электронике, космической технике. В настоящее время проведены многочисленные исследования по широкому комплексу вопросов их физики, гидродинамики и теплофизики, однако мало работ посвящено магнитотепловым явлениям.

Магнитные жидкости — коллоидные растворы, содержащие ферромагнитные материалы размером 5 нм — 10 мкм микрометров в жидкости-носителе. В качестве жидкостеносителя можно применять воду, жидкие углеводороды, кремний, фторорганические жидкости, керосин, а также растительное и трансформаторное масла. Магнитные жидкости устойчивы в течение двух—пяти лет, их текучесть вследствие высокой намагниченности, в десятки тысяч раз больше чем у обычных жидкостей.

Эффективность практического применения магнитных жидкостей во многом определяется зависимостью их намагниченности от температуры, концентрации частиц и приложенного магнитного поля. Выходные показатели магнитожидкостных устройств тем выше, чем выше их намагниченность насыщения и устойчивость к действию сил гравитации, магнитного поля. Другие характеристики и свойства магнитных жидкостей изменяются в зависимости от условий применения. К ним относятся термостойкость, вязкость, токсичность и испаряемость. Поэтому исследования теплофизических свойств межчастичных взаимодействий, ориентационных эффектов, в том числе для магнитной жидкости на основе трансформаторного масла актуальны и перспективны.

Исследование, представленное в данной работе, основано на измерениях температуры и поглощенной энергии образца при быстром локальном нагреве его поверхности лазерным импульсом. Получены опытные данные по теплопроводности, теплоёмкости и температуропроводности коллоидных магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла (трансформаторное масло и железный порошок) при температуре $T = 298\text{—}423$ К, давлении $P = 0,101\text{—}0,141$ МПа, и векторе индукции магнитного поля $B = 1,59\text{—}3,866$ мТл.

Общая масса исследуемого объекта, т. е. магнитной жидкости на основе трансформаторного масла, составляет 0,4 г, добавка железного порошка 0,1—0,3 г с интервалом 0,05 г.

В эксперименте использовали устройство, состоящее из лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), тонометра, реостата, амперметра, катушки, лазерной установки типа ЛГН-109 (длина волны 630 нм, выходная мощность 1 мВт), микро-вольтнаноамперметра типа Ф136, термопары и измерительной ячейки. Методики измерений и экспериментальная установка подробно описаны в [1—7].

Эксперимент проводили следующим образом. Образец помещали в измерительную ячейку. С помощью хромель-алюмелевой термопары измеряли температуру на тыльной стороне образца и строили зависимость $\varepsilon = f(\tau)$ (рис. 1), где ε — выходная термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) термопары.

Температуропроводность образца вычисляли, решая одномерное нестационарное линейное уравнение

$$a = 1,37l^2/(\pi^2\tau_{0,5}),$$

где l — толщина образца; $\tau_{0,5} = 0,5\tau_{\max}$, $\tau_{\max}$ — время нагрева противоположной стороны образца до максимального значения [8].

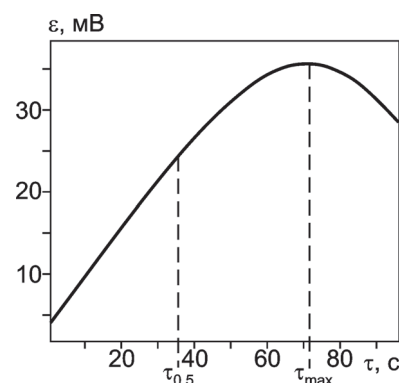


Рис. 1. Зависимость перепада температуры от времени нагрева образца

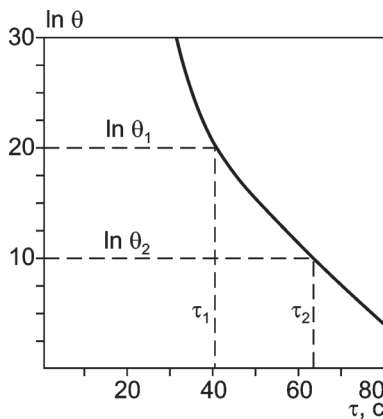


Рис. 2. Зависимость перепада температуры от времени охлаждения образца

Теплопроводность рассчитали по формуле из [9, 10]:

$$\lambda = AC_p m,$$

где C_p — теплоёмкость испытываемого образца; m — темп регулярного охлаждения; A — коэффициент формы.

Коэффициент формы находим как:

$$A = [(\pi/2\delta x)^2 + (\pi/2\delta y)^2 + (\pi/2\delta z)^2]^{-1},$$

где x, y, z — пространственные координаты; δ — толщина стенки контейнера в виде призмы с исследуемым объектом. Темп регулярного охлаждения определяли по формуле

$$m = (\ln \theta_1 - \ln \theta_2) / (\tau_2 - \tau_1) = (\ln N_1 - \ln N_2) / (\tau_2 - \tau_1),$$

где θ_1, θ_2 — разности температур исследуемого образца в начале τ_1 и в конце τ_2 отсчёта; N_1, N_2 — разности температур, соответствующие числу делений шкалы микровольтаноамперметра (рис. 2).

Результаты исследований температуропроводности, теплопроводности, теплоёмкости трансформаторного масла полученные опытным путём при комнатной температуре, приведены в таблице.

Теплофизические свойства трансформаторного масла в зависимости от индукции магнитного поля B и массы ферромагнитного порошка m_{Fe}

$m_{Fe},$ г	$B, \text{ мТл}$						
	1,594	1,990	2,400	2,800	3,200	3,600	3,866
$a \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$							
0,10	0,9650	0,9850	1,001	1,0181	1,0371	1,0610	1,0810
0,15	1,1151	1,1452	1,175	1,2021	1,2321	1,2622	1,2950
0,20	1,2110	1,2371	1,271	1,3110	1,3362	1,3722	1,4120
0,25	1,3210	1,3700	1,420	1,4711	1,5212	1,5820	1,6311
0,30	1,4110	1,4700	1,530	1,6110	1,6620	1,7332	1,8110
$\lambda \cdot 10^3, \text{ Вт/мК}$							
0,10	113,61	115,41	116,72	118,13	119,52	121,45	123,01
0,15	131,20	133,82	136,42	138,44	140,42	142,55	144,63
0,20	145,60	147,93	151,12	153,32	156,73	159,13	162,14
0,25	156,10	160,42	164,50	168,52	172,14	176,83	180,62
0,30	163,40	168,42	173,12	178,93	184,15	189,64	194,54
$C_p, \text{ Дж/кгК}$							
0,10	1146,8	1140,80	1136,30	1129,60	1122,10	1115	1108,30
0,15	1067,9	1060,30	1053,40	1044,80	1034,10	1024,60	1014,90
0,20	1022,6	1015,80	1010,80	1002,40	996,54	986,63	976,73
0,25	938,5	929,25	917,24	909,73	898,64	888,13	879,33
0,30	871,1	860,13	850,20	840,12	833,24	823,43	811,82

Из таблицы следует, что температуропроводность и теплопроводность с ростом индукции магнитного поля и массы ферромагнитного порошка увеличиваются, а теплоёмкость уменьшается. Например при увеличении концентрации ферромагнитного порошка Fe от 0,1 до 0,3 г, при $B=1,595$ мТл температуропроводность образца увеличивается на 46,1 %, теплопроводность на 43,8 %, а теплоёмкость уменьшается на 31,6 %; при $B = 3,866$ мТл, соответственно получим 86,5; 71,2; 41,3 %.

Расчёты показали, что доверительная граница погрешности температуропроводности при измерениях по методу лазерной вспышки, основанных на быстром локальном нагреве поверхности образца лазерным импульсом, в относительной форме при $a = 0,95$ составляет 1—2 %, методическая погрешность 0,2 %, инструментальная 0,4 %. Общая относительная погрешность измерений 1,8 %.

Метод может быть использован для быстрого определения теплофизических свойств магнитных жидкостей в лабораториях. Банк теплофизических величин магнитных жидкостей дополнен новыми данными.

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 229 Т.У. Устройство для определения влияния магнитного поля на изменение температуропроводности магнитных жидкостей / Д. С. Джурев, М. М. Сафаров, Ш. З. Нажмудинов, Ф. Наджмизода, М. А. Зарипова, Х. А. Зоиров, Т. Р. Тиллоева // 2009. Патентный вестник № 54 (2).

2. Пат. 292 Т.У. Устройство для определения температуропроводности магнитных жидкостей / Д. С. Джурев, М. М. Сафаров, Ш. З. Нажмудинов, Ф. Наджмизода, М. А. Зарипова, Х. А. Зоиров, Т. Р. Тиллоева // 2010. Патентный вестник № 57 (1).

3. Пат. 316 Т.У. Способ определения теплопроводности магнитных жидкостей методом лазерной вспышки Д. С. Джурев, М. М. Сафаров, Ш. З. Нажмудинов, Ф. Наджмизода, М. А. Зарипова, Х. А. Зоиров, Т. Р. Тиллоева // 2010. Патентный вестник № 58 (2).

4. Safarov M. M., Djuraev D. S., Zoirov H. A. / Thermal Conductivity of Magnetic Liquids at Room Temperature // 30th International Thermal Conductivity Conference. 18th International Thermal Expansion Symposium: Seven Springs Mountain Resort, Pittsburgh (Pennsylvania USA), 2009. P. 23.

5. Safarov M. M., Djuraev D. S., Zoirov H. A. Temperature Conductivity of Magnetic Liquids (Rocket Fuel) // Seventeenth Symposium Thermophysical Properties. 8th. Boulder (Colorado USA). 2009. P. 300—301.

6. Джураев Д. С., Сафаров М. М., Зоиров Х. А., Неъматов Г. Н. Влияние магнитных полей на изменение температуропроводности и теплоемкости магнитных жидкостей // Магнитные фазовые переходы // Сб. науч. трудов IX Междунар. семинара. Махачкала, 2009. С. 35—37.

7. Джураев Д. С., Сафаров М. М., Зоиров Х. А., Зарипова М. А. Экспериментальная установка для определения влияния магнитного поля на изменение температуропроводности магнитных жидкостей // Теплофизические исследования и изменения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг. Материалы международной теплофизической школы. Тамбов, 2010. С. 49—51.

8. Клименко А. В., Зорина В. М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. М.: Издательство МЭИ, 2001.

9. Фокин В. М., Ковылин А. В., Чернышов В. Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. М.: Спектр, 2011.

10. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.

Дата принятия 27.02.2015 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.4:517.925

Определение вебер-амперных характеристик электротехнических устройств методом натурно-модельного эксперимента

Н. И. ГОРБАТЕНКО, В. В. ГРЕЧИХИН, М. В. ЛАНКИН, А. М. ЛАНКИН

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова, Новочеркасск, Россия, e-mail: vgrech@mail.ru

Рассмотрен алгоритм определения вебер-амперных характеристик электротехнических устройств, основанный на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании. Для построения математической модели использованы методы гармонического баланса и симплекс-оптимизации.

Ключевые слова: вебер-амперная характеристика, натурно-модельный эксперимент, метод гармонического баланса, симплекс-оптимизация, электротехническое устройство.

An algorithm for determining the weber-ampere characteristics of electrical devices on the basis of experimental studies and mathematical modeling. To construct a mathematical model of the electrical device used methods of harmonic balance and the simplex optimization.

Key words: weber-ampere characteristic, natural-model experiment, method of harmonic balance, simplex optimization, electrotechnical device.

Технические и эксплуатационные характеристики электротехнических устройств (ЭУ) в значительной степени определяются магнитными свойствами ферромагнитных материалов. Существуют специальные нормативные документы, регламентирующие порядок измерений магнитных характеристик в ходе приёмосдаточных испытаний. Проведение работ в условиях, близких к предельно допустимым, сопровождается изменениями магнитных свойств ферромагнитных деталей и характеристик ЭУ. Поэтому при эксплуатации особо ответственных приборов необходимо выполнять их диагностику. Для применения известных методов определения магнитных характеристик требуется демонтаж и разборка устройств, а также использование специальных измерительных преобразователей магнитных величин. Решить

проблему можно с помощью метода натурно-модельного эксперимента, основанного на объединении экспериментальных исследований и математического моделирования [1—4]. Этот подход позволяет получить модель, адекватную конкретному испытываемому устройству, что необходимо для его диагностики в процессе производства и эксплуатации.

Алгоритм метода натурно-модельного эксперимента применительно к задаче определения вебер-амперной характеристики ЭУ переменного тока заключается в следующем. На внешние клеммы питания рабочей обмотки прибора подают синусоидальное напряжение и измеряют зависимость силы тока i_n от времени t . Далее выполняют математическое моделирование, измеряют зависимость силы тока $i_m(t)$ и вычисляют уровень расхождений $i_n(t)$, $i_m(t)$ за заданный про-