

УДК 532.5
PACS 83.80.Hj

Вязкость магнитных жидкостей при различных концентрациях коллоидных частиц и температурах

Н. В. Колчанов^a, Е. В. Колесниченко^b

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^a email: kolchanovn@gmail.com

^b email: kolesnichenkoev@gmail.com

В статье представлены результаты эксперимента, в рамках которого измерялся коэффициент динамической вязкости магнитных жидкостей. Магнитные жидкости состоят из жидкости-носителя и твёрдых магнетитовых частиц размером 9–10 нм. В эксперименте использованы два вида магнитных жидкостей – на основе керосина (МЖ_к) и на основе ундекана (МЖ_у). Измерение вязкости производилось с помощью капиллярного вискозиметра, оснащенного специально разработанными для этого эксперимента датчиками. Датчики были изготовлены на основе медь-константановых термопар, которые в совокупности с микровольтметром и часами позволяли измерять время протекания контрольного объема магнитной жидкости через капилляр вискозиметра. В эксперименте был получен массив данных о вязкости МЖ_к и МЖ_у для температур 20, 30, 40, 50 °С и «гидродинамических» концентраций частиц 0.14, 0.23, 0.32, 0.40. Построены графики зависимости динамической вязкости от температуры. Проведено сравнение вязкостей магнитных жидкостей МЖ_к и МЖ_у с известными теоретическими моделями и результатами экспериментов других авторов. Было установлено, что наиболее подходящей для аппроксимации полученных данных является модифицированная модель Чонга. Используя одновременно два подгоночных коэффициента, получено семейство моделей, подобных формуле Чонга, для МЖ_к и МЖ_у. Показано, что значения подгоночных коэффициентов в моделях изменяются с ростом температуры из-за присутствующих в магнитных жидкостях агрегатов. Сделано предположение, что уменьшение коэффициента при линейном члене в моделях происходит из-за убыли среднего размера агрегата с ростом температуры.

Ключевые слова: магнитная жидкость; динамическая вязкость; температурная зависимость

Поступила в редакцию 13.08.2017; принята к опубликованию 15.11.2017

Viscosity of magnetic fluids at various concentrations of colloidal particles and temperatures

N. V. Kolchanov^a, E. V. Kolesnichenko^b

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

^a email: kolchanovn@gmail.com

^b email: kolesnichenkoev@gmail.com

In the paper we present experimental results concerning measurements of dynamic viscosity of magnetic fluids. Magnetic fluids consist of their carrier fluids and solid magnetite particles with 9–10 nm in size. In the experiment we use two types of magnetic fluids – a kerosene-based magnetic

fluid (MF_k) and an undecane-based magnetic fluid (MF_u). Viscosity measurements were carried out by a capillary viscometer equipped with the sensors specially designed for this experiment. Sensors were made on the basis of copper-constantan thermocouples combined with a microvoltmeter and a clock. They allowed measuring the time needed for a control volume of magnetic fluid flows through a capillary of the viscometer. In the experiment, we obtained an array of data on viscosity of the fluids MF_k and MF_u with the “hydrodynamic” particle concentrations of 0.14, 0.23, 0.32, 0.40 at temperatures of 20, 30, 40, 50 °C. We plotted the dynamic viscosity versus temperature. Viscosities of the magnetic fluids MF_k and MF_u were compared with the well-known theoretical models and the experimental results of other authors. It was established that the most appropriate approximation of the obtained data is the modified Chong model. Using two adjustable coefficients at the same time, we had a series of models similar to the Chong model for the fluids MF_k and MF_u. It was shown that values of adjustable coefficients in the models change with increasing temperature due to the aggregates presented in the magnetic fluids. It was assumed that a coefficient of the linear term in models decreased because an average aggregate size reduced as temperature went up.

Keywords: magnetic fluid; dynamic viscosity; temperature dependence

Received 13.08.2017; accepted 15.11.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44

1. Введение

Магнитные жидкости – перспективный материал, применение которого возможно в широком спектре научных и технических приложений. Магнитные жидкости относятся к так называемым наножидкостям, состоящим из несущей жидкой основы и твёрдых частиц, имеющих размеры от 1 до 100 нм. Добавление таких частиц может существенно изменить физические свойства жидкости. Без понятных представлений о свойствах наножидкостей невозможно их полноценное использование в науке и технике.

Настоящая работа посвящена исследованию вязкости магнитной жидкости. Первой, ставшей классической, моделью, которая описывает зависимость вязкости от объёмной доли твёрдых частиц, является формула Эйнштейна

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\varphi), \quad (1)$$

где η – вязкость коллоидной жидкости; η_0 – вязкость жидкости-носителя; φ – объёмная доля пространства, занимаемая частицами. Множество опытов с различными наножидкостями, результаты которых представлены в обзоре [1], показали, что формула (1) удовлетворительно описывает вязкость коллоидной суспензии до объёмных концентраций частиц $\varphi = 2\text{--}3\%$. В более широком диапазоне концентраций для аппроксимации данных опытов лучше подходят квадратичные зависимости:

$$\eta = \eta_0(1 + a\varphi + b\varphi^2), \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты, значение которых зависит от природы, размеров частиц и других характеристик наножидкостей.

В случае магнитной жидкости осложняющим фактором является наличие сурфактанта и процессов агломерации, которые приводят к образованию агрегатов. Сурфактант в магнитной жидкости необходим для того, чтобы магнитные частицы не слипались между собой. Молекулы сурфактанта образуют слой вокруг твёрдой частицы, который создаёт условия для возникновения стерического отталкивания между частицами, и они не слипаются. Но агрегаты всё равно присутствуют в магнитной жидкости, так как в оболочке молекул сурфактанта возможны дефекты. Именно эту гипотезу выдвигают авторы работ [2, 3], в обоснование которой они приводят полученный для разбавленных растворов коэффициент при линейном члене в модели (2). Он оказывается существенно больше эйнштейновского значения 2.5.

Модели [4-6] позволяют проследить за изменением вязкости в концентрированных магнитных жидкостях. Как показали одни из последних экспериментов по измерению вязкости [7-10], количественное согласие с этими моделями возможно в том случае, если вводятся подгоночные коэффициенты. В работе [7] был использован подгоночный коэффициент при вычислении «гидродинамической» концентрации:

$$\varphi = c\varphi_T, \quad (3)$$

где φ_T – объёмная доля твёрдой фазы, c – коэффициент. Ю. Д. Варламов и А. Б. Каплун [7] использовали подгоночное значение $c = 3.2$, при котором наиболее подходящей моделью для аппроксимации данных опыта являлась формула Вэнда [5]. Теоретический анализ [8, 9] и прямые измерения «гидродинамической» концентрации [11] приводят к выводу, что значение коэффициента $c = 3.2$ является завышенным.

Размеры частиц реальной магнитной жидкости имеют дисперсию, которая влияет на вязкость концентрированных суспензий. Модель Чонга [6] учитывает эту дисперсию, но для количественного согласия с результатами опытов эта модель модифицируется [9]:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + 2.25 \frac{\varphi \varphi_m}{\varphi_m - \varphi} \right)^2, \quad (4)$$

где φ_m – «гидродинамическая» концентрация предельной плотной упаковки частиц.

В настоящей работе приводятся и анализируются результаты измерений вязкости магнитной жидкости, которые предшествовали конвективным экспериментам [12–14]. В этих экспериментах использовались два образца магнитных жидкостей: на основе керосина и ундекана. Конвективные структуры течений, возникающие вблизи порога устойчивости механического равновесия, отличаются в этих образцах жидкости. Результаты конвективных экспериментов с магнитной жидкостью сложно интерпретировать и практически невозможно сравнивать с другими исследованиями без понимания механизмов, формирующих основные свойства жидкости, к которым относится вязкость.

2. Описание экспериментальной установки

Для измерений вязкости был выбран капиллярный вискозиметр, потому что работа с ним требует небольшое количество испытуемой жидкости (около 10 мл), и измерения проводятся сравнительно быстро. Он особенно хорош для проведения многочисленных измерений.

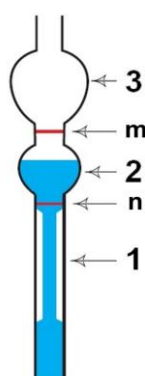


Рис. 1 Измерительное колено капиллярного вискозиметра ВПЖ-2: 1 – капилляр, калибровочного сечения; 2 – измерительный резервуар, 3 – дополнительный резервуар

Измерение вязкости проводилось с помощью специально созданной установки на основе лабораторного капиллярного вискозиметра ВПЖ-2. Он представляет собой U-образную стеклянную трубку, состоящую из двух колен. Измерительное ко-

лено (рис. 1) содержит капилляр 1 калиброванного круглого сечения с диаметром 0.73 мм и два резервуара: измерительный 2 и дополнительный 3. Выше и ниже измерительного резервуара имеются метки «m» и «n», между которыми помещается определённый объём испытуемой жидкости. Время истечения этого объёма определяется в ходе эксперимента. Если измерить время истечения и плотность некоторой эталонной жидкости при определённой температуре, а вязкость взять из справочных таблиц при той же температуре, то можно вычислить коэффициент вязкости исследуемой жидкости при любой температуре, измеряя только время истечения и плотность этой жидкости.

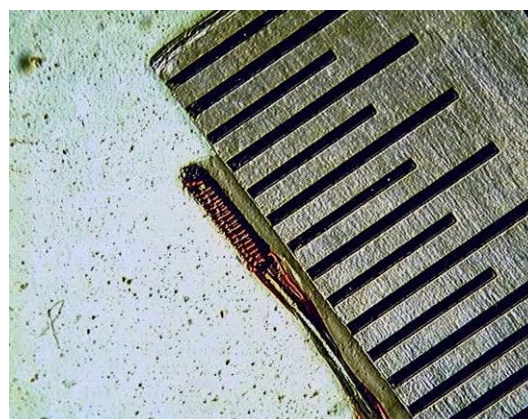


Рис. 2 Внешний вид сая дифференциальной термопары, окружённой медной проволокой

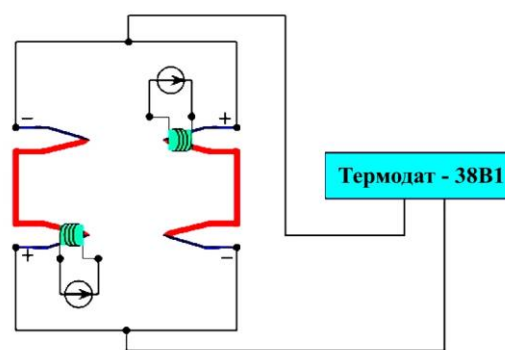


Рис. 3 Схема подключения датчиков к микровольтметру «Термодат–38В1»

Вискозиметр ВПЖ-2 предназначен для измерения вязкости прозрачных жидкостей, поэтому определение уровня магнитной жидкости в его резервуарах затруднительно из-за её непрозрачности. Поэтому был изготовлен специальный датчик уровня, который чувствителен к изменению теплопроводности окружающей датчик среды. Он состоит из дифференциальной термопары, один из спаев которой окружён тонкой медной проволокой (рис. 2), через которую пропускается постоянный ток 0.2 А при напряжении 0.2 В. Напряжение на проволоку подавалось от лабораторного источника питания постоянного тока. Таким образом, вокруг

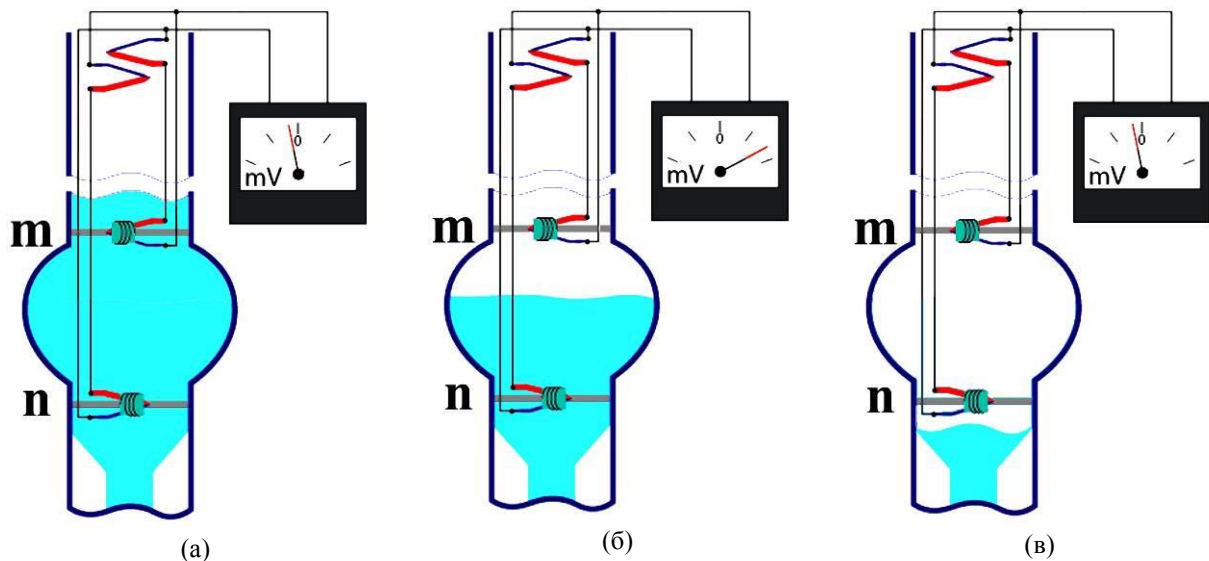


Рис 4 Иллюстрация истечения жидкости из капиллярного вискозиметра: а – уровень жидкости выше отметки «m», оба датчика находятся в жидкости, показание микровольтметра близко к нулю; б – уровень жидкости между отметками «m» и «n», датчик уровня «m» в воздухе, датчик уровня «n» в жидкости, показание микровольтметра отлично от нуля; в – уровень жидкости ниже отметки «n», оба датчика находятся в воздухе, показание микровольтметра близко к нулю

спая создаётся источник тепла постоянной мощности. При размещении такого спая в различных по теплопроводности средах, в нашем случае в воздухе и жидкости, ЭДС термопары будет различной. Было изготовлено два таких датчика для уровней жидкости в измерительном колене вискозиметра, соответствующих меткам «m» и «n». На рис. 3 представлена схема подключения датчиков к микровольтметру «Термодат–38В1». При такой схеме подключения микровольтметр будет давать показания, близкие к нулю, если оба датчика находятся в одной и той же среде. Если один датчик будет в жидкости, а другой в воздухе, то показания микровольтметра будут отличными от нуля.

В целом лабораторная установка состоит из измерительной части вискозиметра ВПЖ-2, которая помещена в ёмкость из оргстекла прямоугольной формы. Ёмкость заполнена водой, температура которой может поддерживаться постоянной с помощью термостата KRIO-VT-01. Температура воды в резервуаре измеряется ртутным термометром с точностью до 0.1 °С. Устройство «Термодат–38В1» подключено к компьютеру, на который передаются данные о разности термоэдс между термопарами каждую секунду. Для затягивания исследуемой жидкости в вискозиметр использовался соединённый с вискозиметром герметичный гофрированный сосуд.

3. Методика проведения измерений вязкости

Метод измерения вязкости с помощью капиллярного вискозиметра является относительным,

что приводит к необходимости использования эталонной жидкости. Формула вычисления вязкости имеет следующий вид:

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho t}{\rho_0 t_0}, \quad (5)$$

где η, ρ, t – коэффициент вязкости, плотность, время истечения исследуемой жидкости, соответственно; η_0, ρ_0, t_0 – коэффициент вязкости, плотность, время истечения эталонной жидкости, соответственно.

В качестве эталонной жидкости использовалось трансформаторное масло. Значения вязкости и плотности трансформаторного масла брались из справочного руководства [15]. Плотность исследуемых образцов магнитной жидкости измерялась пикнометром, объем которого составлял 25 мл.

Время истечения жидкости через капилляр t и t_0 измерялось в соответствии с методикой, проиллюстрированной на рис. 4. Перед началом измерений подавалось питание на термопарные датчики уровня, т.е. с помощью источников постоянного тока (на рис. 4 не изображены) через медную проволоку, которая окружает один из спаев термопары, пропускался электрический ток. При помощи гофрированного сосуда жидкость затягивалась в вискозиметр, полностью заполняя измерительный и частично дополнительный резервуары. При этом оба датчика уровня были погружены в жидкость (рис. 4, а) и показание микровольтметра было близко к нулю. Далее гофрированный сосуд отсоединялся от вискозиметра, и жидкость под действием силы тяжести начинала медленно вытекать

из вискозиметра. Измерение времени истечения начинали в момент, когда уровень жидкости в вискозиметре опускался ниже отметки «т» и показание микровольтметра резко возрастало. Ненулевое показание микровольтметра сохранялось до тех пор, пока уровень жидкости находился между отметками «т» и «п» (рис. 4, б). Окончание измерения времени истечения жидкости через капилляр осуществляли в момент, когда уровень жидкости опускался ниже отметки «п», оба датчика оказывались в воздухе, и показание вольтметра резко устремлялось к нулю (рис. 4, в). Пример изменений показаний микровольтметра с течением времени приведён на рис. 5. Видно, что изготовленные датчики имеют низкую тепловую инерцию, и время истечения t измеряется с точностью до 1–2 с.

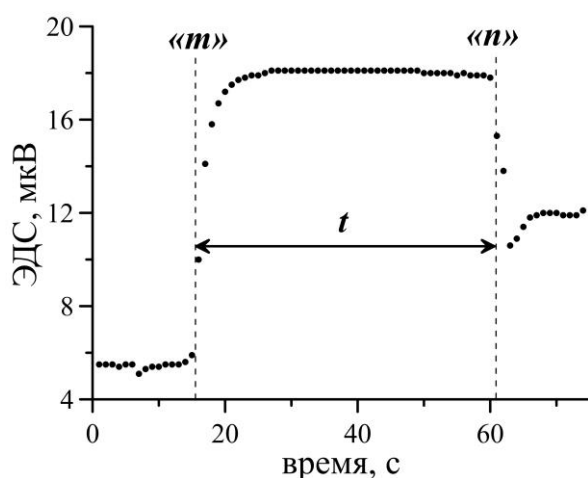


Рис. 5 Пример изменения показаний микровольтметра с течением времени с периодом измерений 1 с

4. Исследуемые образцы магнитных коллоидных жидкостей

В эксперименте использовались две магнитные жидкости. Далее в тексте будем использовать следующие условные обозначения для этих магнитных жидкостей: МЖ_к и МЖ_у.

МЖ_к – магнитная жидкость на основе керосина. Она была изготовлена около 10 лет назад на предприятии ООО «НПВП Феррогидродинамика» в г. Николаев (Украина). На этом предприятии изготавливаются магнитные жидкости, которые можно отнести к промышленным. Их используют при разработке магнитожидкостных уплотнений и амортизаторов.

МЖ_у – магнитная жидкость на основе ундекана. Эта магнитная жидкость была изготовлена 2 года назад в лаборатории прикладной феррогидродинамики (ПНИЛ ПФГД) Ивановского государственного энергетического университета (Россия). МЖ_у нельзя отнести к промышленным магнитным жидкостям, т.к. она была изготовлена по заказу с учё-

том некоторых требований, которые не могут быть реализованы в случае промышленного производства. Одним из таких условий при изготовлении являлось отсутствие свободных молекул сурфактанта в жидкости носителе.

Определение объёмной доли твёрдых частиц производилось по формуле

$$\varphi_T = \frac{\rho_{\text{мжк}} - \rho_n}{\rho_m - \rho_n}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{мжк}}$ – плотность магнитной жидкости; ρ_m – плотность магнетита (5.2 г/см³); ρ_n – плотность жидкости-носителя.

Для целей опыта было подготовлено по 4 образца МЖ_к и МЖ_у. Ниже в таблице 1 представлены значения «гидродинамической» концентрации φ этих образцов.

Таблица 1. «Гидродинамическая» концентрация φ образцов А, В, С, D магнитных жидкостей МЖ_к и МЖ_у

Образец	МЖ _к	МЖ _у
А	0.1404 ± 0.0017	0.142 ± 0.007
В	0.230 ± 0.007	0.238 ± 0.010
С	0.316 ± 0.005	0.319 ± 0.010
Д	0.394 ± 0.007	0.402 ± 0.012

5. Результаты измерений

По окончании эксперимента были получены значения коэффициента вязкости всех образцов магнитных жидкостей МЖ_к и МЖ_у при температурах 20, 30, 40 и 50 °С. Результаты измерений объединены на общих графиках, которые представлены на рис. 6 и 7. Из этих графиков можно заметить, что вязкость уменьшается с ростом температуры. Там же приведены данные (круглые точки) о температурной зависимости вязкости чистой жидкости-носителя (керосина на рис. 6 и ундекана на рис. 7). Сравнение данных магнитной жидкости с данными жидкости-носителя позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением объёмной доли магнетитовых частиц в магнитной жидкости её температурная зависимость вязкости стремится к температурной зависимости вязкости жидкости-носителя. Если сравнить значения коэффициентов вязкости магнитных жидкостей МЖ_к и МЖ_у между собой, то существенное различие температурных зависимостей можно увидеть только для образцов Д с «гидродинамической» концентрацией коллоидных частиц 0.40.

Для сравнения результатов опыта с известными моделями [5, 6, 9] были построены графики зависимости относительной вязкости магнитных жидкостей от «гидродинамической» концентрации коллоидных частиц (рис. 8 и рис. 9). Можно уви-

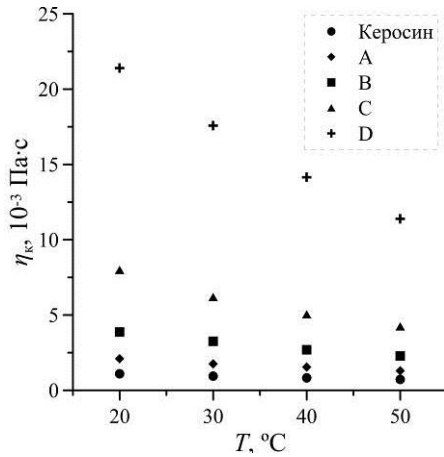


Рис. 6 Зависимость коэффициента вязкости магнитной жидкости $MЖ_k$ от температуры при различных объёмных долях магнетитовых частиц

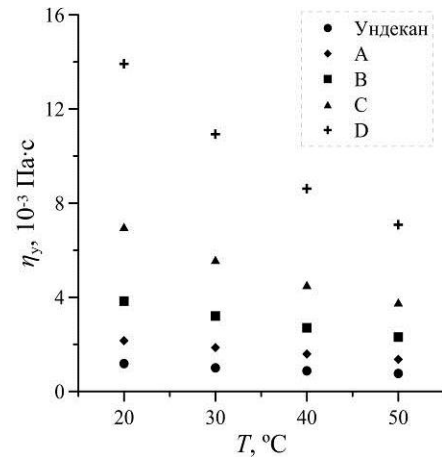


Рис. 7 Зависимость коэффициента вязкости магнитной жидкости $MЖ_y$ от температуры при различных объёмных долях магнетитовых частиц

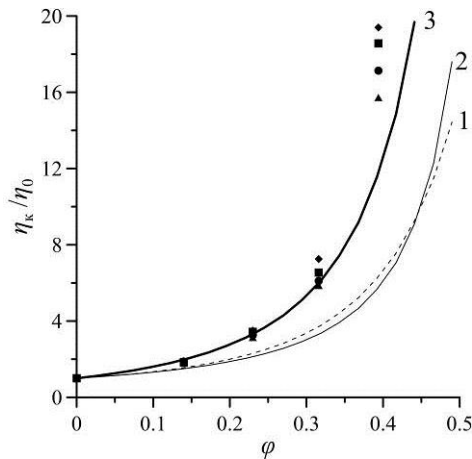


Рис. 8 Зависимость относительной вязкости $MЖ_k$ от концентрации частиц. Ромбы – 20 °C, квадраты – 30 °C, круги – 40 °C, треугольники – 50 °C. Кривая 1 – модель Вэнда, 2 – модель Чонга, 3 – модифицированная модель Чонга

деть, что наиболее подходящей для аппроксимации полученных данных является модифицированная модель Чонга [9].

Для всех образцов $MЖ_y$ (рис. 9) полученные значения относительной вязкости совпадают со значениями модели [9] или модельные значения вязкости оказываются завышенными по сравнению с данными опытов. Максимальное различие наблюдается для образца D при температуре 50 °C и составляет 3.4, или 27% относительно значения модели.

Значения относительной вязкости $MЖ_k$ (рис. 8) совпадают с модифицированной моделью Чонга при $\phi < 0.3$ или лежат выше модельной кривой при $\phi > 0.3$. Максимальная зафиксированная разница значений опыта и модели для образца D при температуре 20 °C равна 7.6, или 64% относительно модельного значения.

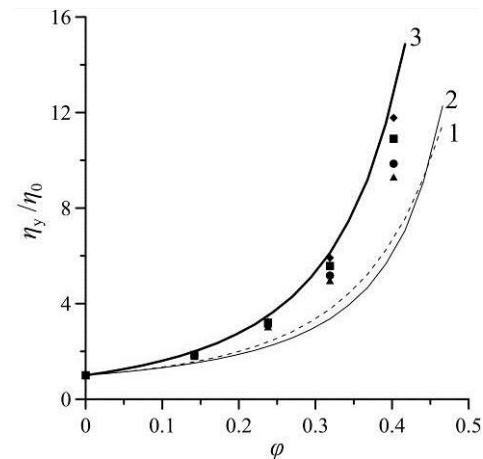


Рис. 9 Зависимость относительной вязкости $MЖ_y$ от концентрации частиц. Ромбы – 20 °C, квадраты – 30 °C, круги – 40 °C, треугольники – 50 °C. Кривая 1 – модель Вэнда, 2 – модель Чонга, 3 – модифицированная модель Чонга

Для более точной аппроксимации данных опыта используем формулу, подобную модели Чонга [6]:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{a}{2} \frac{\phi \phi_m}{(\phi_m - \phi)} \right)^2. \quad (7)$$

В формуле (7) в качестве подгоночных коэффициентов используем коэффициент a при линейном члене в полиномиальном разложении и «гидродинамическую» концентрацию плотной упаковки частиц ϕ_m . Используя метод наименьших квадратов, можно выбрать значения этих коэффициентов таким образом, чтобы полученная концентрационная зависимость вязкости максимально точно воспроизводила данные опытов. В результате мы получаем семейство моделей, каждая из которых работает только для конкретной магнитной жидкости при определённой постоянной температуре.

В таблицах 2 и 3 представлены значения подгоночных коэффициентов, полученных при подгонке модели (7) под данные опытов. Для МЖ_к коэффициент a уменьшается с ростом температуры, а величина ϕ_m не изменяется и имеет значение, которое меньше полученных в других работах: 0.74 ([4]); 0.605 ([6]); 0.612 ([8, 9]). Для МЖ_у a и ϕ_m зависят от температуры по-другому: a практически не изменяется; ϕ_m увеличивается на 10% с ростом температуры от при 20 °С до 50 °С.

Таблица 2. Значения подгоночных коэффициентов для МЖ_к при различных температурах

T, °C	a	ϕ_m
20	4.2	0.52
30	3.9	0.52
40	3.7	0.52
50	3.6	0.52

Таблица 3. Значения подгоночных коэффициентов для МЖ_у при различных температурах

T, °C	a	ϕ_m
20	4.1	0.60
30	4.1	0.63
40	4.0	0.65
50	4.0	0.66

6. Заключение

В рамках исследования проведены измерения коэффициента вязкости двух магнитных жидкостей (МЖ_к и МЖ_у), изготовленных на основе керосина и ундекана. Полученные результаты согласуются с результатами работ других учёных, сделанных ранее. В частности, установленный в настоящей работе факт того, что с уменьшением объёмной доли частиц в магнитной жидкости её температурная зависимость вязкости стремится к температурной зависимости вязкости жидкости-носителя, уже был установлен в экспериментах для немагнитных наножидкостей [1].

Результаты измерений вязкости МЖ_к и МЖ_у показали, что модифицированная модель Чонга лучше других моделей подходит для аппроксимации данных опыта, но даёт лишь качественное описание. Для более точного описания необходимо для каждой магнитной жидкости и температуры подбирать свою аппроксимационную зависимость. В итоге получено большое разнообразие моделей, которое можно объяснить существенной зависимостью вязкости от характеристик агрегатов, присутствующих в магнитной жидкости. Как и коллоидные частицы, агрегаты распределены по размерам. Это распределение зависит от температуры. В частности, с ростом температуры средний

размер агрегатов уменьшается, что приводит к уменьшению коэффициента a . В пределе, можно предположить, что агрегаты из-за интенсивного теплового движения молекул жидкости-носителя и отдельных твёрдых частиц разрушаются, и значение коэффициента a стремится к эйнштейновскому – 2.5.

Аналогичный вывод об изменении размеров агрегатов с ростом температуры делается при анализе результатов конвективного эксперимента [14] с магнитной жидкостью МЖ_у, что говорит о правдоподобности полученных в данной работе результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00040 мол_а.

Список литературы

1. Рудяк В. Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10. Вып. 1. С. 5–22.
2. Бузмаков В. М., Пиеничников А. Ф. О концентрационной зависимости вязкости магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1991. Вып. 1. С. 18–22.
3. *Buzmakov V. M., Pshenichnikov A. F.* On the Structure of Microaggregates in Magnetite Colloids // Journal of Colloid and Interface Science. 1996. Vol. 182. N. 1. P. 63–70. DOI: 10.1006/jcis.1996.0437.
4. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 365 с.
5. *Vand V.* Viscosity of solution and suspensions // Journal of Physical and Colloid Chemistry. 1948. Vol. 52. N. 2. P. 277–299. DOI: 10.1021/j150458a001
6. *Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D.* Rheology of concentrated suspension // Journal of Applied Polymer Science. 1971. Vol. 15. P. 2007–2021. DOI: 10.1002/app.1971.070150818
7. Варламов Ю. Д., Каплун А. Б. Измерение вязкости слабоагрегирующихся магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1986. Вып. 3. С. 43–49.
8. Пиеничников А. Ф., Гилёв В. Г. Вязкость концентрированных магнетитовых коллоидов // Вестник пермского университета. Серия: Физика. 1997. Вып. 2. С. 46–58.
9. Пиеничников А. Ф., Гилёв В. Г. Реология и намагнитченность концентрированных магнетитовых коллоидов // Коллоидный журнал. 1997. Т. 59. Вып. 3. С. 372–379.
10. Лебедев А. В. Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. Вып. 1. С. 78–83.
11. Богатырёв Г. П., Гилёв В. Г. Исследование концентрационной зависимости вязкости маг-

- нитной жидкости во внешнем поле // Магнитная гидродинамика. 1984. Вып. 3. С. 33-37.
12. Казанцев М. Ю., Колчанов Н. В. О гравитационной конвекции в коллоидах // Вестник пермского университета. Серия: Физика. 2012. Т. 22. Вып. 4. С. 79–82.
 13. Kolchanov N. V., Putin G. F. Gravitational convection of magnetic colloid in a horizontal layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 89. P. 90–101. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.050.
 14. Kolchanov N. V., Arefyev I. M. Thermal convection in a layer of magnetic colloid based on a single-component fluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 111. P. 1112–1120. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.099.
 15. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчётов и проектирования. 2-ое издание, дополненное и переработанное. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
- References**
1. Rudyak V. Ya. Sovremenoe sostoyanie isledovani vyazkosti nanozhidkosti (Modern status of researchers of nanofluids viscosity). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 5–22. (In Russian)
 2. Buzmakov V. M., Pshenichnikov A. F. O kontsentratsionoi zavisimosti vyazkosti magnitnih zhidkosti (On the concentration dependence of viscosity of magnetic fluids). *Magnetohydrodynamics*, 1991, no. 1, pp. 18–22. (In Russian)
 3. Buzmakov V. M., Pshenichnikov A. F. On the Structure of Microaggregates in Magnetite Colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, vol. 182, no. 1, pp. 63–70. DOI: 10.1006/jcis.1996.0437.
 4. Rosensweig R. *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, 1985, 344 p.
 5. Vand V. Viscosity of solution and suspensions. *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 1948, vol. 52, no. 2, pp. 277–299. DOI: 10.1021/j150458a001
 6. Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheology of concentrated suspension. *Journal of Applied Polymer Science*, 1971, vol. 15, pp. 2007–2021. DOI: 10.1002/app.1971.070150818
 7. Varlamov Y. D., Kaplun A. B. Izmerenie vyazkosti slaboagregiruyuschih magnitnih zhidkosti (Measurement of viscosity of weakly aggregated magnetic fluids). *Magnetohydrodynamics*, 1986, no. 3, pp. 43–49. (In Russian)
 8. Pshenichnikov A. F., Gilev V. G. Vyazkost' kontsentririrovanih magnetitovih koloidov (Viscosity of concentrated magnetite colloids). *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 1997, no. 2, pp. 46–58. (In Russian)
 9. Pshenichnikov A. F., Gilev V. G. Rheology and magnetization of concentrated magnetite colloids. *Colloid Journal*, 1997, vol. 59, no. 3, pp. 346–353.
 10. Lebedev A. V. Vyazkost' kontsentririrovanih koloidnih rastvorov magnetita (Viscosity of concentrated colloidal solutions of magnetite). *Colloidal Journal*, 2009, vol. 71, no. 1, pp. 78–83. (In Russian)
 11. Bogatirev G. P., Gilev V. G. Isledovanie kontsentratsionoi zavisimosti vyazkosti magnitnoi zhidkosti vo vneshnem pole (Investigation of the concentration dependence of magnetic fluid viscosity in an external field). *Magnetic Hydrodynamics*, 1984, no. 3, pp. 33–37. (In Russian)
 12. Kazantsev M. Y., Kolchanov N. V. O gravitatsionoi konveksii v koloidah (On gravitational convection in colloids). *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2012, vol. 22, no. 4, pp. 79–82. (In Russian)
 13. Kolchanov N. V., Putin G. F. Gravitational convection of magnetic colloid in a horizontal layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 89, pp. 90–101. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.050
 14. Kolchanov N. V., Arefyev I. M. Thermal convection in a layer of magnetic colloid based on a single-component fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 111, pp. 1112–1120. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.099.
 15. Kazantsev E. I. *Industrial furnaces. Design and Calculation Reference Book*, Mir Publishers, 1977, 375 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Колчанов Н. В., Колесниченко Е. В. Вязкость магнитных коллоидных жидкостей при различных температурах и объёмных долях твёрдых частиц // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4 (38). С. 37–45. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44

Please cite this article in English as:

Kolchanov N. V., Kolesnichenko E. V. Viscosity of magnetic colloidal fluids at various temperatures and solid particle volume fractions // *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 4 (38), pp. 37–44. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44