

УДК 544.3.032.5

DOI: 10.31660/0445-0108-2022-6-94-109

**Магнитные жидкости на основе нефти. Синтез, свойства и
перспективы применения**

**В. В. Королев¹, А. Г. Рамазанова^{1*}, О. В. Балмасова¹,
В. И. Яшкова¹, А. И. Валеев²**

¹Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

²ООО «РН-Юганскнефтегаз», Нефтеюганск, Россия

*agr@isc-ras.ru

Аннотация. В данной работе были синтезированы и исследованы магнетитовые магнитные жидкости на основе нефти. Определены их физико-химические параметры (плотность, вязкость, размер частиц магнитной фазы). Проведен ИК-спектроскопический и термогравиметрический анализ. Микрокалориметрическим методом определены магнитокалорические свойства (магнитокалорический эффект и теплоемкость) магнитных жидкостей в интервале температур 278–350 К при изменении магнитного поля от 0 до 1,0 Тл. Максимальное значение магнитокалорического эффекта магнитной жидкости с объемной концентрацией магнитной фазы 0,08 составляет 0,0035 К при 310 К и магнитной индукции 1,0 Тл. Полученные образцы магнитных жидкостей имеют низкую себестоимость по сравнению с устойчивыми магнитными жидкостями на основе полиэтилсилоксанов и алкаренов, так как в качестве жидкости-носителя используется нефть.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитокалорический эффект, удельная теплоемкость, нефтяная промышленность

Для цитирования: Магнитные жидкости на основе нефти. Синтез, свойства и перспективы применения / В. В. Королев, А. Г. Рамазанова, О. В. Балмасова [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2022-6-94-109 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 6. – С. 94–109.

**Oil-based magnetic fluids. Synthesis, properties,
and application prospects**

**Victor V. Korolev¹, Anna G. Ramazanova^{1*}, Olga V. Balmasova¹,
Valentina I. Yashkova¹, Albert I. Valeev²**

¹G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo, Russia

²RN-Yuganskneftegaz Ltd., Nefteyugansk, Russia

*agr@isc-ras.ru

Abstract. In this work, magnetite crude oil-based magnetic fluids have been synthesized and studied. Their physicochemical parameters (density, viscosity, magnetic phase particle size) have been determined. IR spectroscopy and thermogravimetric analysis have been performed. The magnetocaloric properties (magnetocaloric effect and heat capacity) of magnetic fluids have been determined by the microcalorimetric method in the temperature range of 278-350 K in the magnetic field changing its value from 0 to 1.0 T. The maximum value of the magnetocaloric effect of a magnetic fluid with a magnetic phase volume concentration of 0.08 is 0.0035 K at 310 K and at the magnetic induction to 1.0 T. The obtained samples of magnetic fluids have low production costs because crude oil is used as the carrier fluid and can be recommended for various applications of the petroleum and gas industry, for example, for well killing.

Keywords: magnetic fluid, magnetocaloric effect, heat capacity, petroleum industry

For citation: Korolev, V. V., Ramazanova, A. G., Balmasova, O. V., Yashkova, V. I., & Valeev, A. I. (2022). Oil-based magnetic fluids. Synthesis, properties, and application prospects. Oil and Gas Studies, (6), pp. 94-109. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2022-6-94-109

Введение

В условиях экономического кризиса, при резком росте цен на нефть и объемов ее добычи возникает необходимость разработки новых эффективных технологий с использованием нефти. Для достижения этих целей могут быть использованы новые технологии синтеза магнитных жидкостей на основе нефти и создания на их основе новых устройств. В частности, магнитные жидкости, синтезированные из нефти, могут быть использованы в качестве рабочего состава для жидкости глушения добывающих скважин.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные растворы магнитных наночастиц, стабилизированные в жидкости-носителе. МЖ обладает рядом свойств, типичных для магнитоактивных материалов при воздействии магнитного поля. Например, приложение магнитного поля увеличивает вязкость или изменяет температуру магнетика (так называемый магнитокалорический эффект (МКЭ)). В последние два десятилетия постоянно растет интерес к созданию МЖ специального назначения. Этот факт можно объяснить в первую очередь устойчивым ростом потребления углеводородного сырья в мире. К настоящему времени синтезированы магнитные жидкости на различных основах: углеводородных фракциях (керосин), воде, силиконовых маслах и фторуглеродах, различных искусственных органических жидкостях (сложных эфирах, алкил- и диалкилбензолах). Область применения магнитных жидкостей в последнее время постоянно расширяется. Благодаря ряду уникальных свойств МЖ нашли применение в самых различных отраслях промышленности [1]. Их можно использовать для снижения гидравлического сопротивления в трубопроводах для транспортировки вязких жидкостей [2]; в оборудовании на основе магнитных жидкостей; для обработки призабойной зоны скважины магнитоактивными жидкими материалами [3]; при направленном гидроразрыве горных пород [4]; при очистке воды от нефтепродуктов [5]; в магнитожидкостных смазках [6]. Одной из основных проблем, решаемых при эксплуа-

тации скважин, является глушение добывающей скважины для капитального ремонта и/или обслуживания. Магнитные жидкости можно использовать в нефтяной и газовой промышленности, поскольку магнитная жидкость не смешивается с пластовой водой; использование нефти того же месторождения при синтезе МЖ значительно снижает стоимость МЖ и расширяет диапазон ее рабочих температур; герметизация скважины МЖ снижает объем жидкости глушения. Сегодняшняя нефтяная промышленность пытается решить проблемы бурения, эксплуатации и ремонта скважин с помощью магнитных наночастиц [7, 8]. Но, несмотря на большой объем экспериментальных данных, многие вопросы остаются без ответа. Наноразмерные магнитные частицы быстро окисляются, что приводит к ослаблению магнитных свойств и, как следствие, к ухудшению их эксплуатационных характеристик [6]. А попытки использовать магнитореологические суспензии для поддержания термической и реологической стабильности рабочих составов пока не увенчались успехом [9]. Все эти проблемы должны быть решены как можно скорее.

В настоящее время ученые проводят исследования по созданию магнитных жидкостей на основе новых дисперсионных сред, открывают новые способы синтеза МЖ для снижения себестоимости производства, хотя такие попытки не всегда бывают успешными. Также ведутся работы по регенерации МЖ для их повторного использования. Использование нефти в качестве дисперсионной среды в магнитных жидкостях значительно снижает себестоимость их производства и создает хорошие перспективы для использования МЖ в нефтедобывающей промышленности, где требуются большие объемы магнитной жидкости. Важным преимуществом магнитной жидкости является отсутствие трудностей в варьировании ее плотности и вязкости без потери качества и стабильности. Жидкости с плотностью более $1,6 \text{ г/см}^3$ могут применяться для создания противодействия между пластовым давлением и атмосферным давлением. При увеличении вязкости жидкости глушения отсутствует утечка жидкости в пласт.

Можно привести несколько вариантов использования МЖ в процессе глушения нефтяных скважин: 1) использование в качестве жидкости глушения определенной плотности, которая закачивается в скважину (изменение плотности жидкости может достигаться путем варьирования концентрации магнитной фазы); 2) жидкость может закачиваться в скважину и удерживаться электромагнитным поршнем; меняя величину магнитного поля вокруг поршня, вязкость жидкости вокруг поршня может меняться в значительных пределах, вызывая эффект глушения; 3) использование внутри скважины специально сконструированных устройств в виде поршня с электромагнитной обмоткой и контейнером для МЖ; при пропускании электрического тока через обмотку поршня происходит подача МЖ в специальные кольцевые зазоры на поверхности электромагнитного поршня и удержание ее в зазорах постоянным магнитным полем; при небольших зазорах между поршнем и внутренней стенкой скважины магнитная жид-

кость в кольцевых зазорах под воздействием магнитного поля способна выдерживать перепад давлений сверху и снизу поршня до нескольких атмосфер.

Известно, что при воздействии магнитного поля на магнитную жидкость возникает магнитокалорический эффект, который связан с намагниченностью, теплоемкостью и температурой МЖ определенными соотношениями. Поскольку вязкость МЖ также сильно зависит от температуры, и, следовательно, будет зависеть от величины МКЭ, возникающего при воздействии магнитного поля на МЖ. Поэтому при проектировании магнитокалорических устройств, для глушения нефтяных скважин с помощью МЖ, необходимо знать и учитывать величину МКЭ и теплоемкость магнитной жидкости. Новые экспериментальные данные о физико-химических и магнитокалорических свойствах (магнитокалорический эффект и теплоемкость) магнитных жидкостей могут существенно расширить область их применения в различных областях.

В данной работе получены и исследованы магнетитовые магнитные жидкости на основе нефти Приобского месторождения. Определены их физико-химические и магнитные характеристики (плотность, вязкость, степень намагниченности, размер частиц магнитной фазы). Проведен ИК-спектроскопический и термогравиметрический анализ магнитных жидкостей. Микрокалориметрическим методом в интервале температур 278–350 К и при изменении магнитного поля от 0 до 1,0 Тл определены магнитокалорические свойства (магнитокалорический эффект и теплоемкость) магнитных жидкостей.

Методы и эксперимент

Использовались следующие коммерческие реагенты Acros Organics: сульфат железа (II) ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 99 %), хлорид железа (III) ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 98 %), водный аммиак (NH_4OH , 25 %), олеиновая кислота ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, 97 %) и алкениллантарный ангидрид ($\text{C}_{76}\text{H}_{145}\text{O}_3$, 80 %). Использовалась сырая нефть Приобского месторождения.

Наночастицы магнетита были синтезированы методом соосаждения солей сульфата железа (II) и хлорида железа (III), избытком водного раствора аммиака (NH_4OH) при температуре 298 К. Подобный метод описан в работе [10]. Полученную суспензию многократно промывали дистиллированной водой до достижения удельной электропроводности промывной воды ($1,77 \text{ мкСм см}^{-1}$), как указано в работе [11]. Кристаллическую структуру частиц магнетита определяли методом рентгеноструктурного анализа на многофункциональном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) (дифракция при малых углах $2\theta = 3\text{--}140^\circ$). Размер частиц измеряли с помощью Zetasizer nano ZS (Malvern Instruments Ltd, Великобритания). Результаты анализа показали, что кристаллы магнетита имеют структуру шпинели (JCPDS Card 19-0629) и размер большинства кристаллов магнетита находится в диапазоне 10–20 нм [12].

Дисперсионной средой служил образец нефти Приобского месторождения (характеристики предоставленного компанией ООО «РН-Юганскнефтегаз» образца нефти приведены в табл. 1).

Таблица 1

Параметры и характеристики нефти

Параметр	Значение
Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с	1,48
Вязкость нефти в поверхностных условиях, мПа·с	21
Плотность нефти в пластовых условиях, кг/м ³	760
Плотность нефти в поверхностных условиях, кг/м ³	870
Объемный коэффициент нефти, д.ед.	1,18
Содержание серы, % масс.	1,23
Содержание парафинов, % масс.	2,48
Содержание сероводорода, %	—

МЖ готовили путем стабилизации наночастиц магнетита в дисперсионной среде. Свежеприготовленный магнетит сначала центрифугировали для удаления воды. Поверхность частиц стабилизировали мономолекулярным слоем поверхностно-активного вещества (ПАВ), после чего стабилизированный магнетит пептизировали в дисперсионной среде при $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6–10 часов. Для качественной стабилизации поверхности магнитных частиц необходимы знания о процессах, происходящих на их поверхности. Изучение процессов адсорбции поверхностно-активных веществ на магнитных частицах позволяет получить количественное соотношение магнетит — стабилизатор. Было установлено, что стабилизатора (ПАВ) должно быть 30 % (масс.) от массы твердой магнитной фазы. Эта величина важна при промышленных масштабах производства магнитных жидкостей [13]. Ранее для получения количества ПАВ, адсорбированного на единице поверхности твердой магнитной фазы, были изучены процессы адсорбции ненасыщенных жирных кислот (олеиновой, линолевой, линоленовой и нафтеновой) на поверхности магнетита и ряде других ферритов [13, 14]. В результате был сделан вывод, что наиболее эффективным ПАВ является смесь олеиновой кислоты и алкенилянтарного ангидрида [11], который и был использован для стабилизации магнетита. Такая смесь ПАВ повышает качество и область применения магнитных жидкостей. Состав образцов и их свойства приведены в таблице 2 и на рисунках 1–4.

Состав и свойства синтезированных образцов магнитной жидкости (T = 298 K)

Образец	МЖ 1	МЖ 2	МЖ 3
Состав	Магнетит (1 часть)/ Олеиновая кислота (0,4 части)/ Нефть (2,5 части)	Магнетит (1 часть)/ (Олеиновая кислота + алкенилянтарный ангидрид (0,4 части))/ Нефть (5,0 частей)	Магнетит (1 часть)/ Олеиновая кислота (0,4 части)/ Нефть (5,0 частей)
Свойства			
Плотность, кг/м ³	1 207	1 067	1 058
Вязкость, мПа·с	797	735	503
Объемная концентрация магнитной фазы (в долях единицы)	0,08	0,05	0,04
Намагниченность насыщения, кА/м	29	17	16
Размер магнитной частицы, нм	23	20	19

Физико-химические и магнитокалорические свойства магнитных жидкостей сильно зависят от концентрации магнитной фазы, и, следовательно, путем изменения концентрации магнитных частиц можно изменять физико-химические параметры магнитных жидкостей в широком диапазоне значений в зависимости от целей их использования и задач.

ИК-спектры синтезированных образцов получали на ИК-фурье-спектрометре VERTEX 80v (NETZSCH, Германия). Термогравиметрический анализ выполнен на термомикровесах TG 209 F1 Iris (NETZSCH, Германия).

Теплоемкость в нулевых магнитных полях измеряли на калориметре DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия) при температурах 273–390 К. Погрешность эксперимента определения теплоемкости составила 2 %. Каждый эксперимент повторяли пять раз. Кроме того, теплоемкость в магнитных полях измерялась специальным микрокалориметром [15]. Исследования проводились в диапазоне температур 288–350 К и в магнитных полях 0–1,0 Тл. Погрешность эксперимента определения теплоемкости составила 3 %. Следует отметить, что значения теплоемкости магнитной жидко-

сти, полученные на калориметре DSC 204 F1, согласуются с данными, полученными на специальном микрокалориметре.

В более ранних исследованиях [11] было замечено, что образцы магнитных жидкостей проявляют типичное суперпарамагнитное поведение, при этом магнитный гистерезис на кривых намагничивания отсутствует.

Магнитокалорический эффект магнитной жидкости изучали с помощью специально сконструированного микрокалориметра [15]. Экспериментальная погрешность пятикратно повторенных измерений МКЭ не превышала 2 %. Надежность используемого метода проверялась калибровкой микрокалориметра металлическим гадолинием (химическая чистота 98 %) [15].

Количество тепла $Q_{\text{МКЭ}}$ (Дж/г), выделяющегося при включении магнитного поля, рассчитывалось по уравнению (1)

$$Q_{\text{МКЭ}} = Q_J (\Delta T / \Delta T_J), \quad (1)$$

где Q_J — джоулево тепло, вводимое в калориметрический эксперимент, Дж/г; ΔT_J — изменение температуры в калориметрической системе в результате подвода джоулевого тепла, К; ΔT — изменение температуры в калориметрической системе в результате воздействия магнитного поля (МКЭ), К; Уравнение теплового баланса [15] принимает следующий вид (2):

$$Q_{\text{МКЭ}} = m_{(\text{МЖ})} C_{p(\text{МЖ})} \Delta T_{\text{МКЭ}}, \quad (2)$$

где $\Delta T_{\text{МКЭ}}$ — изменение температуры, то есть МКЭ, К; $m_{(\text{МЖ})}$ — масса магнитной жидкости, г; $C_{p(\text{МЖ})}$ — теплоемкость магнитной жидкости, Дж/г·К.

Были рассчитаны значения изменения энтропии исследуемых молекулярных магнетиков в магнитном поле, ΔS (Дж/г·К), используя значения C_p в нулевых полях по уравнению (3)

$$\Delta S = - C_p \Delta T_{\text{МКЭ}} / T, \quad (3)$$

где C_p — удельная теплоемкость; $\Delta T_{\text{МКЭ}}$ — магнитокалорический эффект; T — абсолютная температура.

Результаты и обсуждение

По данным рентгеноструктурного анализа синтезированного магнетита пики, обнаруженные на порошковой дифрактограмме при $2\theta = 18.39$; 30.35 ; 35.69 ; 37.21 ; 43.34 ; 53.62 ; 57.27 ; 62.73 и 74.430 , согласно JCPDS Card 19-0629, относятся к чистому однофазному кристаллическому магнетиту. Результаты анализа показали, что кристаллы магнетита имеют структуру шпинели.

На рисунке 1 представлены ИК-спектры синтезированной магнитной жидкости (образец 2) и значения основных пиков. Внешний вид кривых для других образцов аналогичен.

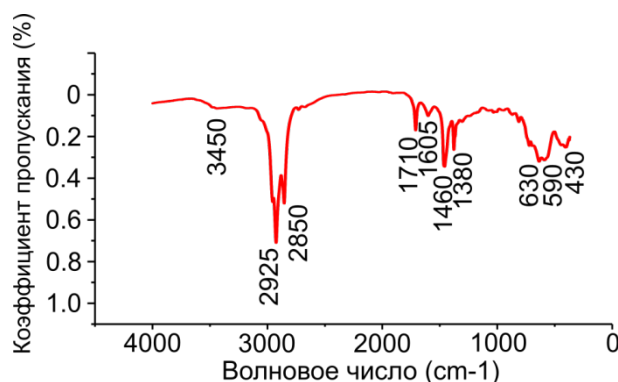


Рис. 1. ИК-спектры магнитной жидкости (образец 2)

Широкая полоса в области $3\,200\text{--}3\,600\text{ см}^{-1}$ (пик с максимумом при $3\,450\text{ см}^{-1}$) отражает поглощение молекулами воды, адсорбированными на поверхности магнетита, и гидроксильными группами, связанными водородной связью. По своему химическому составу нефть относится к сложным углеводородным соединениям, содержащим смесь углеводородов метанового, нафтенового и ароматического рядов. Полосы $2\,925$ и $2\,850\text{ см}^{-1}$ в ИК-спектре образцов относятся к валентным колебаниям С-Н и не меняются в процессе синтеза магнитной жидкости. Узкая полоса с максимумом при $1\,710\text{ см}^{-1}$ отражает валентные колебания $\text{C}=\text{O}$ карбоксильной группы олеиновой кислоты. Ранее было установлено, что олеиновая кислота хемосорбируется на поверхности магнетита [16], что приводит к исчезновению полосы $1\,710\text{ см}^{-1}$ в спектре магнитной жидкости. Наличие этой полосы в спектре представленных образцов свидетельствует о физической адсорбции ПАВ на поверхности магнетита. Двойной пик с максимумами интенсивности при 630 , 590 и 430 см^{-1} можно отнести к колебаниям кристаллической решетки магнетита (Fe_3O_4) [16]. Соотношение интегральных интенсивностей полос составляет $2:1$, что соответствует стехиометрическому соотношению оксидов железа и железа соответственно ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}$).

На дериватограмме образца нефти (см. рис. 2) можно выделить три основных участка, соответствующих испарению сначала легколетучих бензиновых фракций (180 °C), затем менее летучих керосиновых ($200\text{--}300\text{ °C}$) и, наконец, масляных фракций (выше 300 °C) из углеводородной смеси. По дериватограмме можно провести групповой анализ состава нефти [17]. Исследуемый образец нефти представляет собой смесь следующих компонентов: бензин-лигроин ($T_{\text{исп.}} = 124,9\text{ °C}$), керосин-газойль ($T_{\text{исп.}} = 184,4\text{ °C}$), парафин + масло легкое ($T_{\text{исп.}} = 382,6\text{ °C}$) и кокс (асфальтен) ($T_{\text{исп.}} = 587,9\text{ °C}$). Содержание кокса составляет всего $8\text{ масс. \%}$ (см. рис. 2). Убыль массы образца чистой нефти при 100 °C составляет $12,5\text{ \%}$. Данное значение характеризует количество легколетучих фракций нефти и воды в образце. Уменьшение массы образца магнитной жидкости начинается при температуре на 100 °C выше, чем чистой нефти (нефть при

69,3 °С, МЖ при 164,1 °С), что свидетельствует о взаимодействии компонентов МЖ между собой, отсутствии воды в МЖ и, как следствие, об увеличении термической устойчивости МЖ по сравнению с чистой нефтью (см. рис. 2 и 3).

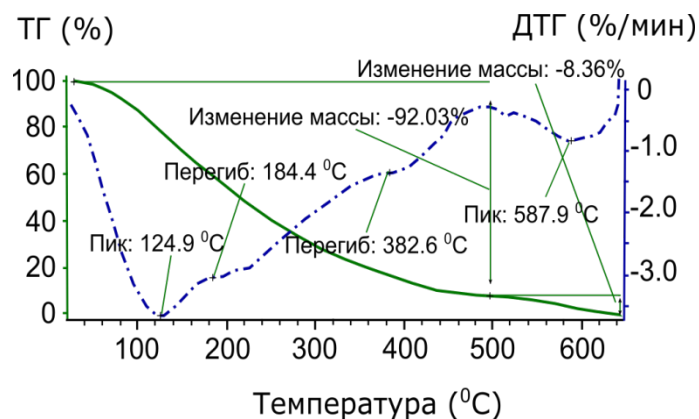


Рис. 2. Дериватограмма чистой нефти

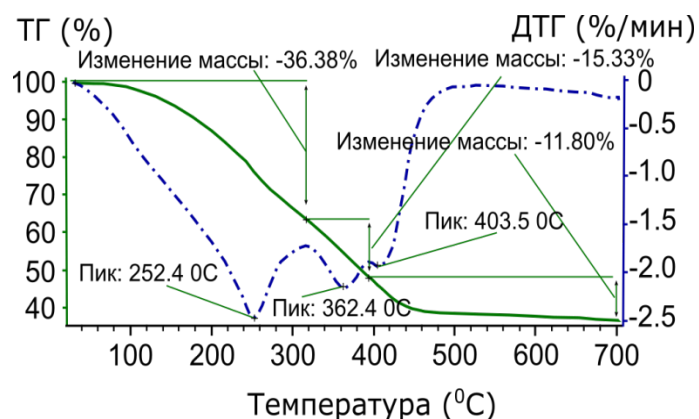


Рис. 3. Дериватограмма магнитной жидкости (образец 2)

В нулевом магнитном поле теплоемкость образца увеличивается с ростом температуры от 1,5 до 2,1 (Дж/г·К) и коррелирует с данными термогравиметрического анализа. Внешний вид кривых для других образцов аналогичен. Теплоемкость является весьма чувствительным параметром для изучения магнитных фазовых переходов. На рисунке 4 не видно резкого увеличения удельной теплоемкости в исследованном интервале температур, что означает отсутствие фазовых переходов. Полученные в данной работе данные об удельной теплоемкости имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение.

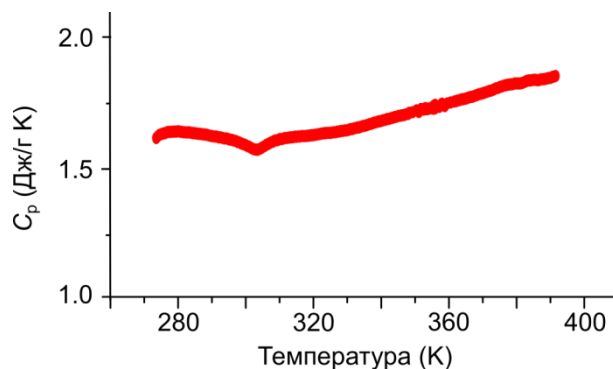


Рис. 4. Температурная зависимость удельной теплоемкости магнитной жидкости (образец 2) в нулевых магнитных полях

На рисунке 5 представлены экспериментально полученные полевые зависимости магнитокалорического эффекта образца 2 при четырех температурах. Внешний вид кривых для других образцов аналогичен. МКЭ образца 2 магнитной жидкости увеличивается с увеличением значения магнитного поля. Эти зависимости имеют классический вид, характерный для твердых магнетиков.

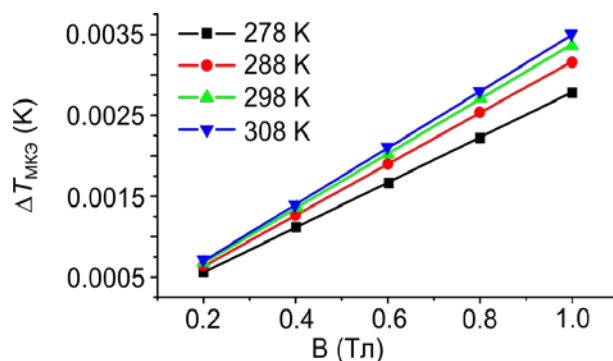


Рис. 5. Зависимость магнитокалорического эффекта образца 2 от магнитной индукции

Экспериментальные данные температурной зависимости магнитокалорического эффекта магнитной жидкости (образец 2) представлены на рисунке 6. Внешний вид кривых для других образцов аналогичен представленным и здесь не приводится.

Основным экспериментально установленным фактом является наличие положительных значений МКЭ в образцах магнитной жидкости при температуре, близкой к комнатной. При увеличении индукции магнитного поля до 1,0 Тл МКЭ образца 2 составляет 0,0035 К при 310 К. Заметные изменения температуры коллоида наблюдаются только вблизи температуры Кюри. В точке Кюри резко изменяются теплоемкость, МКЭ и энтропия

МЖ (имеется скачок или излом на температурной зависимости). С практической точки зрения резкое изменение свойств рабочих тел не всегда полезно (за исключением магнитовязкого эффекта магнитореологических суспензий). Исследуемые в данной работе магнитные жидкости не имеют максимумов на температурных зависимостях C_p , $\Delta S_{МКЭ}$, $\Delta T_{МКЭ}$, а это означает отсутствие фазового перехода и перспективность их промышленного использования, например, в нефтяной промышленности. Низкие значения МКЭ (см. рис. 6) можно объяснить низкой концентрацией магнитных частиц в образцах МЖ (см. табл. 1). Это означает, что для достижения высоких значений МКЭ необходимо синтезировать концентрированные магнитные жидкости с концентрацией магнитной фазы более 60 об. % [18].

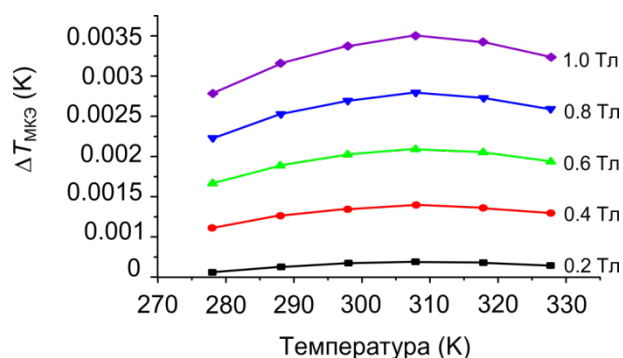


Рис. 6. Температурные зависимости магнитокалорического эффекта образца 2 в различных магнитных полях (магнитная индукция показана на графике)

На основании экспериментальных данных по $\Delta T_{МСЕ}$ были рассчитаны изменения энтропии ($\Delta S_{МКЭ}$). Температурные зависимости $\Delta S_{МКЭ}$ представлены на рисунке 7.

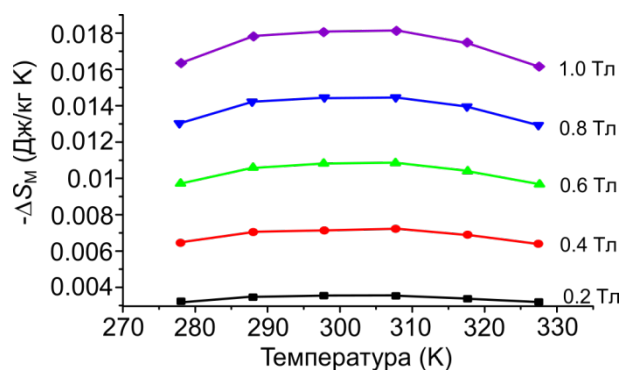


Рис. 7. Температурные зависимости изменения энтропии образца 2 в различных магнитных полях (магнитная индукция показана на графике)

Низкие значения $\Delta S_{\text{МКЭ}}$ являются следствием малой концентрации магнитной фазы, а характер температурной зависимости аналогичен типу изменения магнитокалорического эффекта и подтверждает сделанные ранее выводы.

Выводы

Таким образом, в данной работе были синтезированы магнетитовые магнитные жидкости на основе нефти. Определены физико-химические и термодинамические параметры полученных образцов (плотность, вязкость, размер частиц магнитной фазы), проведены их термогравиметрический и ИК-спектроскопический анализы. Все образцы магнитных жидкостей проявляли типичное суперпарамагнитное поведение. Микрокалориметрическим методом при 278–350 К в магнитном поле 0–1,0 Тл определены магнитокалорический эффект и теплоемкость магнитных жидкостей, а также температурные зависимости изменения энтропии образцов в магнитных полях. Значения МКЭ линейно растут с увеличением величины магнитного поля и имеют классический вид, характерный для твердых магнетиков. Максимальное значение МКЭ магнитной жидкости с объемной концентрацией магнитной фазы 0,08 составляет 0,0035 К при 310 К и увеличении магнитной индукции до 1,0 Тл.

Полученные образцы магнитных жидкостей имеют низкую себестоимость производства за счет использования нефти в качестве дисперсионной среды и могут быть рекомендованы для различных применений в нефтегазовой отрасли, как в магнитных устройствах, так и для создания противодавления. Концентрация магнитных частиц и, следовательно, их физико-химические параметры могут варьироваться в широком диапазоне значений в зависимости от целей их использования и решаемых задач. Для практических применений в качестве жидкости противодавления необходимо использовать магнитные жидкости с большей плотностью (1 600 кг/м³ и более), то есть магнитная жидкость должна быть концентрированной, чтобы достичь сильного магнитокалорического эффекта.

Магнитные жидкости следует разрабатывать и применять для условий минимального повреждения продуктивного нефтяного пласта и обеспечения необходимых ремонтно-изоляционных работ в нефтяной скважине.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН (№ гос. регистр. 122040500044-4). Работа выполнена с помощью ЦКП «Верхневолжский областной центр физико-химических исследований».

Список источников

1. Ko, S. Use of nanoparticles for oil production applications / S. Ko, C. Huh. – DOI 10.1016/J.PETROL.2018.09.051. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 172. – P. 97–114.

2. A comparative study for evaluating the performance of five coatings applied on Fe₃O₄ nanoparticles for inhibition of asphaltene precipitation from crude oil / N. Setoodeh, P. Darvishi, A. Lashanizadegan, F. Esmailzadeh. – DOI 10.1080/01932691.2019.1634581. – Direct text // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2020. – Vol. 41, Issue 11. – P. 1616–1632.
3. Experimental investigation of wettability alteration of carbonate gas-condensate reservoirs from oil-wetting to gas-wetting using Fe₃O₄ nanoparticles coated with Poly (vinyl alcohol), (PVA) or Hydroxyapatite (HAp) / A. Safaei, F. Esmailzadeh, A. Sardarian [et al.]. – Text : electronic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 184. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106530>. – Published: 30.09.2019.
4. Effect of NiO/SiO₂ nanofluids on the ultra-interfacial tension reduction between heavy oil and aqueous solution and their use for wettability alteration of carbonate rocks / K. P. Dahkaee, M. T. Sadeghi, Z. Fakhroueian, P. Esmailzadeh. – DOI 10.1016/J.PETROL.2019.01.024. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 176. – P. 11–26.
5. Obtaining Synthetic Magnetite and Ferromagnetic Fluid from Industrial Waste to Purify Water from Petroleum Products / S. Z. Kalaeva, V. M. Makarov, N. L. Markelova, R. E. Kalaev. – Text : electronic // Journal of Pollution Effects & Control. – 2020. – Vol. 8, Issue 1. – URL: <https://doi.org/10.35248/2167-0420.20.8.240>. – Published: 29.02.2020.
6. Магнитные жидкости в машиностроении / Д. В. Орлов, Ю. О. Михалёв, Н. К. Мышкин, В. В. Подгорков ; под редакцией Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. – Москва : Машиностроение, 1993. – 268 с. – Текст : непосредственный.
7. Application of magnetic nanoparticles in petroleum industry : A review / K. Zhou, X. Zhou, J. Liu, Z. Huang. – Text : electronic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 188. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106943>. – Published: 13.01.2020.
8. Simonsen, G. Potential applications of magnetic nanoparticles within separation in the petroleum industry / G. Simonsen, M. Strand, G. Oye. – DOI 10.1016/J.PETROL.2018.02.048. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 165. – P. 488–495.
9. Flow behavior and thermal resistance of xanthan gum in formate brine / D. Reinoso, M. J. Martín-Alfonso, P. F. Luckham, F. J. Martínez-Boza. – Text : electronic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 188. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2019.106881>. – Published: 30.12.2019.
10. Влияние магнитного поля и температуры на кристаллизацию высокодисперсных частиц магнетита / А. Е. Завадский, К. В. Железнов, А. Г. Рамазанова [и др.]. – Текст : непосредственный // Доклады Академии Наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 362–364.
11. Magnetoviscous effect in ferrofluids with different dispersion media / D. Y. Borin, V. V. Korolev, A. G. Ramazanov [et al.]. – DOI 10.1016/j.jmmm.2016.05.024. – Direct text // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 416. – P. 110–116.
12. Characterization of inherent clusters in water-based magnetite magnetic fluid / K. Shinoda, B. Jeyadevan, M. Kasai [et al.]. – DOI 10.1016/S0304-8853(02)00711-4. – Direct text // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – Vol. 252. – P. 141–143.

13. Adsorption and Magnetothermal Phenomena of High-Disperse Magnetite / A. G. Ramazanova, O. V. Balmasova, D. V. Korolev, V. V. Korolev. – Direct text // Magnetite : Structure, Properties and Application. – New York (USA) : Nova Science Publishers, 2011. – P. 143–178.
14. Балмасова, О. В. Адсорбция нафтенной кислоты на поверхности магнетита при различных температурах / О. В. Балмасова, А. Г. Рамазанова, В. В. Королёв. – DOI 10.7868/S0044453715030061. – Текст : непосредственный // Журнал физической химии. – 2015. – Т. 89, № 3. – С. 486–489.
15. The calorimetric method of evaluating the performance of magnetocaloric materials / V. V. Korolev, D. V. Korolev, A. G. Ramazanova. – DOI: 10.1007/s10973-018-7704-y. – Direct text // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 136. – P. 937–941.
16. Королёв, В. В. Адсорбция поверхностно-активных веществ на высокодисперсном магнетите / В. В. Королёв, А. Г. Рамазанова, А. В. Блинов. – DOI 1066-5285/02/5111-2044. – Текст : непосредственный // Известия АН. Серия химическая. – 2002. – № 11. – С. 1888–1893.
17. Химическая энциклопедия : в 5 т. / Под редакцией И. Л. Кнунянц. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1992. – Текст : непосредственный.
18. Physico-chemical and magneto-thermal properties of magnetic fluids based on synthetic oil "Alkaren" / V. V. Korolev, A. G. Ramazanova, O. V. Balmasova, D. V. Korolev. – DOI 10.22364/mhd.49.1-2.16. – Direct text // Magnetohydrodynamics. – 2013. – Vol. 49, Issue 1. – P. 127–134.

References

1. Ko, S., & Huh, C. (2019). Use of nanoparticles for oil production applications. Journal of Petroleum Science and Engineering, 172, pp. 97-114. (In English). DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.09.051
2. Setoodeh, N., Darvishi, P., Lashanizadegan, A., & Esmaeilzadeh, F. (2020). A comparative study for evaluating the performance of five coatings applied on Fe₃O₄ nanoparticles for inhibition of asphaltene precipitation from crude oil. Journal of Dispersion Science and Technology, 41(11), pp. 1616-1632. (In English). DOI: 10.1080/01932691.2019.1634581
3. Safaei, A., Esmaeilzadeh, F., Sardarian, A., Mousavi, S., & Wang, X. (2020). Experimental investigation of wettability alteration of carbonate gas-condensate reservoirs from oil-wetting to gas-wetting using Fe₃O₄ nanoparticles coated with Poly (vinyl alcohol), (PVA) or Hydroxyapatite (HAp). Journal of Petroleum Science and Engineering, 184. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106530>
4. Dahkaee, K. P., Sadeghi, M. T., Fakhroueian, Z., & Esmaeilzadeh, P. (2019). Effect of NiO/SiO₂ nanofluids on the ultra-interfacial tension reduction between heavy oil and aqueous solution and their use for wettability alteration of carbonate rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering, 176, pp. 11-26. (In English). DOI: 10.1016/J.PETROL.2019.01.024
5. Kalaeva, S. Z., Makarov, V. M., Markelova, N. L., & Kalaev, R. E. (2020). Obtaining Synthetic Magnetite and Ferromagnetic Fluid from Industrial Waste to Purify Water from Petroleum Products. Journal of Pollution Effects & Control, 8(1). (In English). Available at: <https://doi.org/10.35248/2167-0420.20.8.240>

6. Orlov, D. V., Mikhalev, Yu. O., Myshkin, N. K., & Podgorkov, V. V. (1993). *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 268 p. (In Russian).
7. Zhou, K., Zhou, X., Liu, J. & Huang, Z. (2020). Application of magnetic nanoparticles in petroleum industry: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 188. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106943>
8. Simonsen, G., Strand, M., & Oye, G. (2018). Potential applications of magnetic nanoparticles within separation in the petroleum industry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, pp. 488-495. (In English). DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.02.048
9. Reinoso, D., Martín-Alfonso, M. J., Luckham, P. F., & Martínez-Boza, F. J. (2020). Flow behavior and thermal resistance of xanthan gum in formate brine. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 188. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2019.106881>
10. Zavodskiy, A. E. Zheleznov, K. N., Ramazanova, A. G., Balmasova, O. V., Korolev, V. V., & Yashkova, V. I. (1998). Vliyanie magnitnogo polya i temperatury na kristallizatsiyu vysokodispersnykh chastits magnetita. *Doklady Akademii Nauk*, 36(3), pp. 362-364. (In Russian).
11. Borin, D. Y., Korolev, V. V., Ramazanova, A. G., Odenbach, S., Balmasova, O. V., Yashkova, V. I., & Korolev, D. V. (2016). Magnetoviscous effect in ferrofluids with different dispersion media. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 416, pp. 110-116. (In English). DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.024
12. Shinoda, K., Jeyadevan, B., Kasai, M., Nakatani, I., Oka, H., & Tohji, K. (2002). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Characterization of inherent clusters in water-based magnetite magnetic fluid, 252, pp. 141-143. (In English). DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00711-4
13. Ramazanova, A. G., Balmasova, O. V., Korolev, D. V., & Korolev, V. V. (2011). *Adsorption and Magnetothermal Phenomena of High-Disperse Magnetite*. Magnetite: Structure, Properties and Application. USA, New York, Nova Science Publishers, pp. 143-178. (In English).
14. Balmasova, O. V., Ramazanova, A. G., Korolev, V. V. (2015). Adsorption of naphthenic acid on magnetite at different temperatures. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 89(3), pp. 487-490. (In English). DOI: 10.1134/S0036024415030061
15. Korolev, V. V., Korolev, D. V., & Ramazanova, A. G. (2018). The calorimetric method of evaluating the performance of magnetocaloric materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, pp. 937-941. (In English). DOI: 10.1007/s10973-018-7704-y
16. Korolev, V. V., Ramazanova, A. G., & Blinov, A. V. (2002). Adsorption of surfactants on superfine magnetite. *Russian Chemistry Bulletin*, (51), pp. 2044-2049. (In Russian). DOI: 1066-5285/02/5111-2044
17. Knunyants, I. L. (1992). *Khimicheskaya entsiklopediya: v 5 tomakh*. Moscow, Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya Publ. (In Russian).
18. Korolev, V. V., Ramazanova, A. G., Balmasova, O. V., & Korolev, D. V. (2013). Physico-chemical and magneto-thermal properties of magnetic fluids based on synthetic oil "Alkaren". *Magnetohydrodynamics*, 49(1), pp. 127-134. (In English). DOI: 10.22364/mhd.49.1-2.16

Информация об авторах

Королев Виктор Васильевич, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН, г. Иваново

Рамазанова Анна Геннадьевна, кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, г. Иваново, agr@isc-ras.ru

Балмасова Ольга Владимировна, кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, г. Иваново

Яшкова Валентина Ивановна, инженер-исследователь, Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН, г. Иваново

Валеев Альберт Ильгизярович, менеджер проекта по новым технологиям, Группа новых технологий УППРиГТМ, Подразделение заместителя Генерального директора — Главного геолога, ООО «РН-Юганскнефтегаз», г. Нефтеюганск

Information about the authors

Victor V. Korolev, Doctor of Chemistry, Lead Researcher, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo

Anna G. Ramazanova, Candidate of Chemistry, Researcher, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo, agr@isc-ras.ru

Olga V. Balmasova, Candidate of Chemistry, Researcher, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo

Valentina I. Yashkova, Research Associate, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo

Albert I. Valeev, New Technology Project Manager, New Technology Group, UPRP & GTM, Unit of Deputy General Director — Chief Geologist, RN-Yuganskneftegaz Ltd., Nefteyugansk

Статья поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022; принята к публикации 26.10.2022.

The article was submitted 31.03.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 26.10.2022.