

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275

УДК 537.84

Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок

О. Н. Лабкович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Магнитная жидкость является перспективным смазывающим материалом, например в подшипниках скольжения. С помощью магнитной системы магнитная жидкость удерживается в зазоре трения, что существенно упрощает конструкцию системы смазки. Известно, что при течении обычных смазок (минерального масла, воды) в зазоре между цилиндрами с ростом скорости вращения внутреннего цилиндра происходит переход ламинарного течения в вихревое. При этом резко возрастают потери на вязкое трение. Экспериментально исследованы потери на трение в широком интервале скоростей и возможности их снижения при вихревом течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами. Выявлено, что при достижении безразмерной скорости – числа Тейлора, равного 41,2, – резко увеличивается угол наклона кривой момента трения, вязкие потери тоже возрастают, т. е. происходит смена ламинарного режима течения на вихревой. Средняя температура в слое магнитной жидкости достигает 60 °С. Этот фактор приводит к повышению испарения жидкости-носителя (воды, минерального масла), что снижает ресурс работы смазки – магнитной жидкости. С целью уменьшения вязкого трения при вихревом течении магнитной жидкости в нее вводятся углеродные нанотрубки, представляющие собой цилиндры диаметром до 5,0 нм и длиной около 0,1 мм. Углеродные нанотрубки проявляют упругость при поперечном изгибе: под воздействием нагрузки изгибаются, а после ее снятия восстанавливают первоначальную форму. Они также способны удлиняться вдоль оси на 16 % и после снятия нагрузки возвращаться в исходное положение. Экспериментально получен эффект снижения трения (около 30 %) при вихревом течении магнитной жидкости введением углеродных нанотрубок в магнитные жидкости МНТ-40 и МВ-32. Вероятный механизм уменьшения трения – способность нанотрубок деформироваться под воздействием пульсаций давления и скоростей вихревого потока и частично поглощать часть их энергии. Как показали эксперименты, существует оптимальная весовая концентрация добавки нанотрубок в магнитную жидкость ($\sim 10^{-4}$), при которой наблюдается максимальный эффект снижения трения на 30 %. Таким образом, введение углеродных нанотрубок в смазку (магнитную жидкость) позволяет снижать вязкое трение и соответственно увеличивать диапазон рабочих скоростей, повышать ресурс смазочного узла.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное поле, однослойные углеродные нанотрубки, вихревое течение

Для цитирования: Лабкович, О. Н. Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок / О. Н. Лабкович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 3. С. 265–275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275

Адрес для переписки

Лабкович Ольга Николаевна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 231-64-58
ftug@bntu.by

Address for correspondence

Labkovich Olga N.
Belarusian National Technical University
14 Ya. Kolas str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 231-64-58
ftug@bntu.by

Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes

O. N. Labkovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Magnetic fluids are promising lubricating material, in particular, in sliding bearings. With the aid of the magnetic system the magnetic fluid is held in the gap of friction that simplifies the design of the lubrication system sufficiently. It is known that when conventional lubricants (mineral oil, water) flow, with increasing of speed of rotation of the inner cylinder the transition of laminar flow in a vortex takes place. This dramatically increases the viscous friction losses. The friction losses in a wide range of speeds and possibilities of their decrease due to the vortex flow of the magnetic fluid in the gap between the cylinders are experimentally studied. It is revealed that when the dimensionless speed – number of Taylor equal to 41.2 – is reached, the slope of the curve of friction torque sharply increases, viscous losses also increase, i. e. there is a change laminar flow to a vortex one. The average temperature in the layer of the magnetic fluid reaches 60 °C. This factor leads to increased evaporation of the carrier liquid (water, mineral oil), which reduces the service life of the lubricant i.e. the magnetic fluid. In order to reduce viscous friction when a vortex flow of magnetic fluids takes place, carbon nanotubes, which are cylinders with a diameter of 5.0 nm and a length of about 0.1 mm, are brought into the magnetic fluid. Carbon nanotubes demonstrate elasticity under transverse bending: they curve under the impact of load, and after its removal they restore their original shape. They are also able to elongate along the axis by 16 % and to return to its original position after removal of the load. The effect of reducing friction (about 30 %) with a vortex flow of magnetic fluid by the introduction of carbon nanotubes in a magnetic fluid is experimentally obtained. The likely mechanism of friction reduction is the ability of nanotubes to deform under the influence of pressure pulsations and the velocity of the swirling flow, and to absorb partially a part of their energy. As it was experimentally demonstrated, there is an optimum weight concentration of the additive of nanotubes in the magnetic fluid ($\sim 10^{-4}$) that is associated with the maximum effect of reducing friction by 30 %. Thus, the insertion of carbon nanotubes in the lubricant (magnetic fluid) makes it possible to reduce the viscous friction and, consequently, to increase the range of operating speeds, to strengthen the online lubricant site.

Keywords: magnetic fluid, magnetic field, single-layered carbon nanotubes, vortex flow

For citation: Labkovich O. N. (2017) Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (3), 265–275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275 (in Russian)

Введение

Магнитные жидкости являются перспективным материалом в качестве смазки, поскольку удерживаются магнитным полем в области трущихся поверхностей [1]. Кроме того, представляет интерес уменьшение трения при течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами. В [2] показана возможность снижения вязкого трения в магнитной жидкости при введении углеродных наночастиц – фуллеренов C_{60} – при невысоких скоростях сдвига – до 10^3 c^{-1} . Влияние фуллеренов на вязкое трение с ростом

температуры уменьшается от 40 % при температуре 20 °С до 10 % при 60 °С, что ограничивает возможность использования фуллеренов.

Анализ литературы показывает, что снижение диссипативного разогрева может происходить при введении в вихревой поток воды растворов полимеров – полиэтиленоксидов, полиакриламидов, отличающихся большой относительной молекулярной массой (до $6 \cdot 10^6$) и малой долевой концентрацией полимера по массе – порядка $(5 \cdot 10^{-6})$ – $(10 \cdot 10^{-6})$ кг на 1 кг воды. Также применяются поверхностно-активные вещества, имеющие длинноцепочечное строение. Предполагается, что длинноцепочечные молекулы полимеров и поверхностно-активных веществ под воздействием пульсаций давлений и скоростей вихревого течения деформируются, поглощая часть энергии пульсаций, снижая этим интенсивность вихрей. Приведенные выше способы уменьшения вихревого течения получены для воды, данные для масла отсутствуют. Кроме того, с повышением температуры потока до 70 °С, что характерно для систем смазки, эффективность добавок высокомолекулярных полимеров и поверхностно-активных веществ резко уменьшается.

Представляет интерес использование однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в качестве добавок, снижающих вихревое трение. Однослойные углеродные нанотрубки (диаметр до 5,0 нм, длина ~0,1 мм) проявляют высокую упругость при изгибе. Под действием нагрузки в направлении, нормальном к продольной оси, они деформируются, а после снятия нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму, т. е. работают как демпфирующее устройство [3–5]. Углеродные нанотрубки также способны удлиняться вдоль оси на 16 % и после снятия нагрузки возвращаться в исходное положение. Таким образом, имеются предпосылки к тому, что ОУНТ смогут эффективно гасить пульсации давления и скоростей вихревого потока, т. е. снижать диссипативный разогрев. Введение немагнитных частиц в магнитную жидкость во внешнем магнитном поле способствует их ориентированию вдоль силовых линий магнитного поля. Это создает дополнительные возможности по управлению ориентацией немагнитных частиц в магнитной жидкости и расширению ее применения.

Автором статьи экспериментально исследовано влияние добавок ОУНТ на вязкое трение при вихревом течении магнитной жидкости между цилиндрами, один из которых вращается.

Проведение исследований

Исследования проводились на модифицированном вискозиметре НААКЕ Viscotester VT 550. Измерительный узел, представленный на рис. 1, состоял из магнитопровода 1, постоянного кольцевого магнита 2, немагнитного корпуса 3, термостатируемого внешнего цилиндра 4, внутреннего вращающегося цилиндра 8. С помощью термодатчиков 5 и 6 производили контроль температур на поверхностях цилиндров радиусами R_2 и R_1 , образующих радиальный зазор, в котором находилась магнитная жидкость 7.

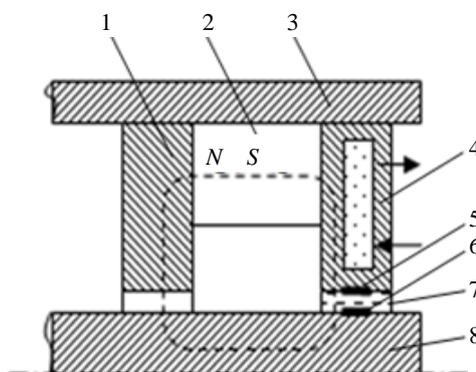


Рис. 1. Измерительный узел

Fig. 1. The measurement site

Момент трения на внутреннем цилиндре R_1 измеряли с помощью торсионного устройства. Погрешность измерения момента не превысила 2 %. Величина радиального зазора ($r = R_2 - R_1$) изменялась от 0,1 до 0,7 мм. Осевой размер слоя магнитной жидкости l соответствовал 20 мм. Линейная скорость внутреннего цилиндра v изменялась от 0 до 20 м/с, максимальная скорость сдвига γ была около 10^5 с^{-1} . В процессе опыта при разных скоростях сдвига температура магнитной жидкости T изменялась от 20 до 60 °С.

Магнитная система в исследуемом зазоре создает однородное радиальное магнитное поле H с максимальной напряженностью 400 кА/м. Исследование осевого распределения магнитного поля показало, что его неоднородность не превышала 6 %.

Использовали магнитные жидкости на трансформаторном масле и магнетите с намагниченностью насыщения 40 кА/м (ММт-40) и на воде и магнетите с намагниченностью насыщения 32 кА/м (МВ-32). С целью повышения устойчивости растворов магнитные жидкости центрифугировали при 6000g и подвергали магнитной сепарации. Кривые намагничивания приведены на рис. 2.

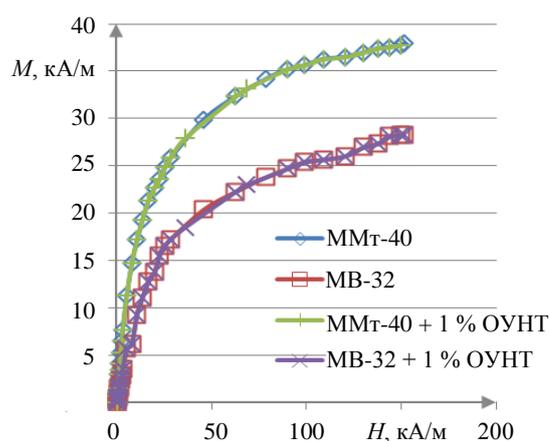


Рис. 2. Кривые намагничивания ММт-40 и МВ-32

Fig. 2. Curves of magnetization of MMt-40 (the magnetic fluid based on transformer oil) and MV-32 (the water-based magnetic fluid)

Физические свойства магнитных жидкостей при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $H = 0$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства магнитных жидкостей

Physical properties of magnetic fluids

Магнитная жидкость	Коэффициент вязкости η , Па·с	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Плотность ρ , кг/м ³	Диаметр частиц магнетита d , нм
МВ-32	0,0147	0,72	1200	<15
ММт-40	0,0600	0,18	1300	<15

С целью снижения потерь на трение в области ламинарного и вихревого течений в качестве добавок в магнитную жидкость диспергированием вводили ОУНТ. Они представляют собой полые немагнитные цилиндры диаметром до 5 нм и длиной 0,005–0,120 мм. Исследования показали, что малые добавки немагнитных ОУНТ с весовой концентрацией от 1,000 до 0,001 % в магнитные жидкости не оказывали влияния на их намагниченность (рис. 2).

Важной особенностью магнитной жидкости с введенными в нее немагнитными нанотрубками является то, что внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие на нанотрубки. Установлено, что внешнее магнитное поле действует на немагнитную частицу в магнитной жидкости с силой, пропорциональной квадрату намагниченности жидкости [6]. В результате воздействия поля в магнитной жидкости возможно образование упорядоченных структур из нанотрубок.

Выполнено исследование структурирования нанотрубок в магнитной жидкости в магнитном поле. Для этого готовили растворы жидкостей, которые наносили на прозрачную стеклянную подложку тонким слоем и высушивали как при отсутствии, так и в присутствии магнитного поля. Затем исследовали их с помощью электронного микроскопа Primo Star.

В отсутствие магнитного поля ОУНТ расположены хаотически. Это хорошо видно на фотографии образца магнитной жидкости МВ-32 с добавкой однослойных углеродных нанотрубок, приведенной на рис. 3.



Рис. 3. Фотография частиц однослойных углеродных нанотрубок в магнитной жидкости МВ-32 без магнитного поля ($\times 10^{10}$)

Fig. 3. Photograph of single-layered carbon nanotubes particles in the magnetic fluid MV-32 without the magnetic field ($\times 10^{10}$)

Фотографии образцов магнитной жидкости МВ-32 с добавкой ОУНТ представлены на рис. 4 и 5. При выдержке образцов в магнитном поле ($H = 400$ кА/м) однослойные углеродные нанотрубки ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля. В этом случае при небольшой их концентрации ($c = 10^{-5}$) они образуют дискретные структуры, как изображено на рис. 4.

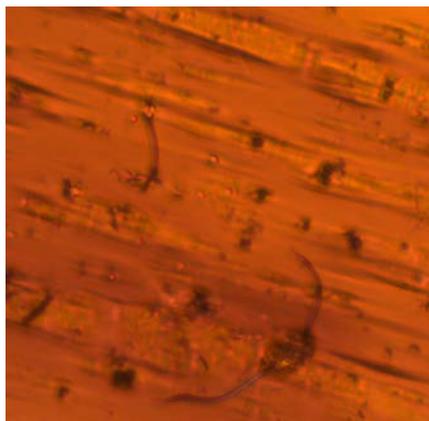


Рис. 4. Фотография позиционирования однослойных углеродных нанотрубок ($c = 10^{-5}$) в МВ-32 магнитным полем ($\times 10^4$)

Fig. 4. Photograph of positioning of single-layered carbon nanotubes ($c = 10^{-5}$) in the magnetic fluid MV-32 by magnetic field ($\times 10^4$)



Рис. 5. Фотография позиционирования однослойных углеродных нанотрубок ($c = 10^{-4}$) в МВ-32 магнитным полем ($\times 10^4$)

Fig. 5. Photograph of positioning of single-layered carbon nanotubes ($c = 10^{-4}$) in the magnetic fluid MV-32 by magnetic field ($\times 10^4$)

В нижней части рис. 4 и в середине слева видны дуги, расположенные поперек силовых линий магнитного поля – это многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые обладают более жесткими механическими свойствами. Поэтому силы магнитного поля ($H = 400$ кА/м) не достаточно для их позиционирования в направлении поля.

Исследования положения ОУНТ производили при разных концентрациях. Установлено, что при увеличении весовой концентрации ОУНТ до $c = 10^{-4}$ они образуют длинноцепочечные структуры вдоль магнитного поля. Это хорошо видно на рис. 5.

На процесс образования структур влияет вязкость магнитной жидкости, которая является основой суспензии. Поэтому была изучена вязкость магнитной жидкости как без добавок однослойных углеродных нанотрубок, так и с добавками ОУНТ, а также определена ее температурная зависимость. В процессе проведения опыта полученные данные показали зависимость динамического коэффициента вязкости магнитных жидкостей от температуры, которая определялась их основой (трансформаторным маслом и водой) (рис. 6). Приведенные на рис. 6 данные получены в отсутствие магнитного поля.

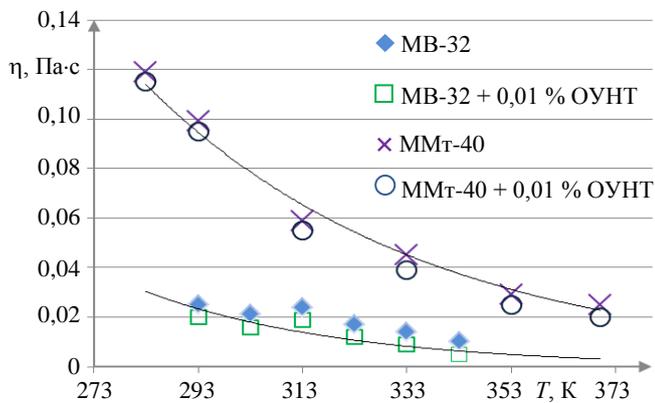


Рис. 6. Температурная зависимость вязкости магнитных жидкостей и суспензий на их основе

Fig. 6. Temperature dependence of viscosity of magnetic fluids and suspensions based on them

В отсутствие магнитного поля добавка однослойных углеродных нанотрубок в магнитную жидкость в диапазоне концентраций c от 10^{-2} до 10^{-6} не оказала влияния на вязкость жидкости, что может объясняться их деформацией в потоке. В ряде работ [7, 8] показано, что течение воды и минерального масла в зазоре между цилиндрами при вращении внутреннего цилиндра и условиях, близких к условиям данного исследования (величина радиального зазора 0,127 мм, 0,225 мм), с повышением скорости переходит из ламинарного в вихревое. Смена режима течения осуществляется при критическом числе Тейлора, равном 41,2. Здесь число Тейлора определено как

$$Ta = Re \left(\frac{r}{R_1} \right)^{0.5},$$

где $Re = \frac{rV}{\nu}$; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Необходимо отметить, что вода и минеральное масло использовались в качестве жидкостей-носителей при изготовлении магнитных жидкостей, применяемых в проводимых экспериментах. Поэтому аналогии с результатами приведенных выше работ являются вполне корректными.

Критическое число Ta определяли из зависимости момента трения от линейной скорости цилиндра. При критическом числе Ta происходит резкое увеличение угла наклона кривой измеряемого момента трения, т. е. переход ламинарного течения жидкости в вихревое. Вихри Тейлора наблюдались авторами [7] визуальными и подтверждались возникновением радиальных пульсаций скоростей, зафиксированных пленочным термоанемометром.

В [9] численно исследовалось куэттовское течение магнитной жидкости в поперечном магнитном поле при высоких скоростях сдвига. При выпол-

нении ее диссипативного разогрева показано, что учет теплового и реологического факторов (изменение вязкости от магнитного поля) может привести к возникновению участков с неустойчивым течением магнитной жидкости.

На установке, изображенной на рис. 1, были получены зависимости момента трения от линейной скорости внутреннего цилиндра v , необходимые для определения характера течения магнитной жидкости. Эти зависимости для безразмерной скорости (числа Тейлора) приведены на рис. 7. При небольших скоростях вращения ($Ta < 35$) зависимость момента трения от скорости носит линейный характер, что свидетельствует о ламинарном течении магнитных жидкостей.

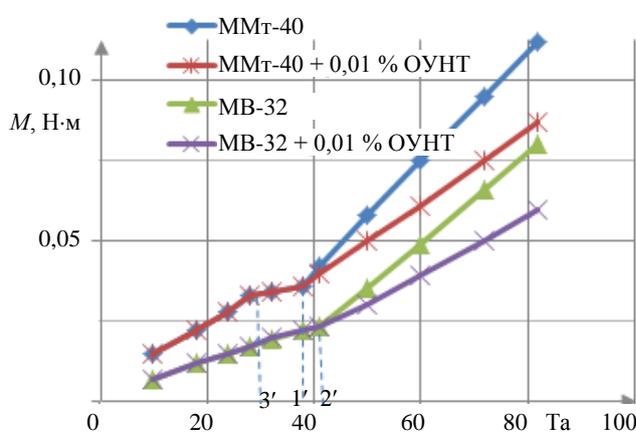


Рис. 7. Зависимость момента трения от числа Тейлора

Fig. 7. The dependence of friction torque on the number of Taylor

С повышением скорости экспериментально обнаружено резкое увеличение угла наклона кривой момента трения (числа Ta , соответствующие точкам 1' и 2'), что, согласно результатам [7, 8], свидетельствует о переходе ламинарного течения в вихревое. Критическое число Тейлора (точка 2') для магнитной жидкости МВ-32 соответствует его классическому значению 41,2. В то же время критическое число Тейлора для магнитной жидкости на основе трансформаторного масла ММт-40 оказалось меньше классического на 15 %.

Для ММт-40 (рис. 7) при числе Ta , соответствующем точке 3', момент трения не изменяется до значения числа Ta , соответствующего точке 1', после которого происходит резкое увеличение угла наклона. Согласно [9], в данной области течение магнитной жидкости неустойчиво, а это может привести к более раннему образованию вихревого течения. При этом перепад температур между цилиндрами составлял 12 °С, что приводило к изменению вязкости в радиальном направлении; течение магнитной жидкости, по мнению авторов [9], становилось неустойчивым.

Течения суспензий магнитных жидкостей ММт-40 и МВ-32 с добавками ОУНТ исследовали в диапазоне весовых концентраций c от 10^{-6} до 10^{-2} .

Влияние концентрации однослойных углеродных нанотрубок c на относительный коэффициент трения c_{f1}/c_f (где c_{f1} – коэффициент трения с добавкой ОУНТ) показано на рис. 8.

Коэффициент трения без добавки ОУНТ определяли из выражения

$$c_f = \frac{\tau}{\frac{\rho v^2}{2}} = \frac{M_{\text{тр}}}{\pi \frac{\rho}{2} v^2 R_1^2 l},$$

где $M_{\text{тр}}$ – измеренный момент трения; l – осевой размер слоя магнитной жидкости (20 мм); ρ – плотность магнитной жидкости; v – линейная скорость внутреннего цилиндра; R_1 – момент трения на внутреннем цилиндре.

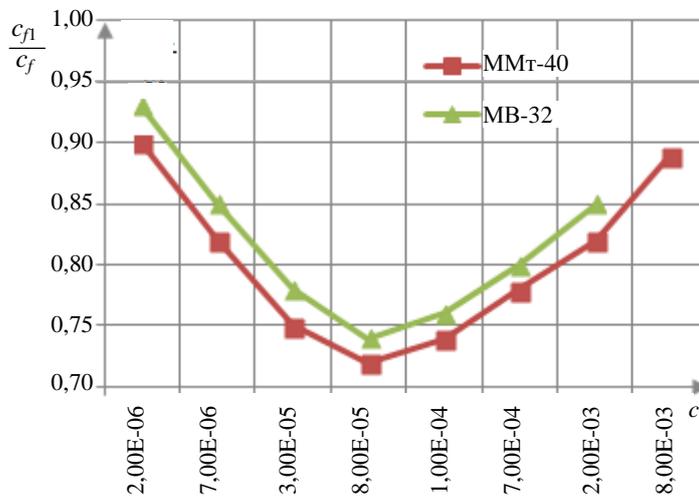


Рис. 8. Зависимость эффекта снижения трения от концентрации однослойных углеродных нанотрубок

Fig. 8. The dependence of the effect of reducing friction on the concentration of single-layered carbon nanotubes

Коэффициент трения снижался в области вихревого течения, причем наибольший эффект уменьшения трения достигается при концентрации однослойных углеродных нанотрубок $c \sim 10^{-4}$ (или 0,01 %). Эффективность влияния добавок оценивали относительным коэффициентом трения. В данном случае образуются длинные структуры из ОУНТ, изображенные на рис. 5. В радиальном магнитном поле ($H = 400$ кА/м) эти структуры выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля, т. е. в радиальном направлении. При вращении внутреннего цилиндра под влиянием конкурирующего воздействия магнитных и гидродинамических сил с увеличением скорости происходит ориентация ОУНТ и их структур в направлении потока. С ростом скорости возникает вихревое течение ($Ta > Ta_{кр}$), при котором наблюдаются радиальные пульсации скоростей [7] и, как следствие, – резкое увеличение потерь на трение. Вероятно, в рассматриваемом случае радиальные пульсации скоростей, воздействуя на однослойные углеродные нанотрубки, которые осью направлены по потоку, деформи-

руют их, теряя часть своей энергии, что уменьшает интенсивность их пульсаций и в конечном итоге приводит к снижению потерь на трение. При рассмотрении механизма воздействия ОУНТ на вихревой поток возможны аналогии с влиянием малых добавок высокомолекулярных полимеров при вихревых течениях воды [10], в том числе и для течений в зазоре между цилиндрами [11]. В этих случаях наблюдали существенное снижение потерь на трение, что, по мнению автора, связано с деформацией и разрушением длинноцепочечных молекул полимеров в вихревых потоках.

С увеличением скорости в области вихревого течения эффективность добавок однослойных углеродных нанотрубок повышается. Это объясняется ростом интенсивности вихревого движения и соответственно повышением эффективности демпфирующего воздействия ОУНТ на поток, что показано на рис. 9. Измеренные при этом средние температуры в слое магнитной жидкости не превышали 60 °С. На рис. 9 приведены данные для магнитного поля напряженностью 400 кА/м.

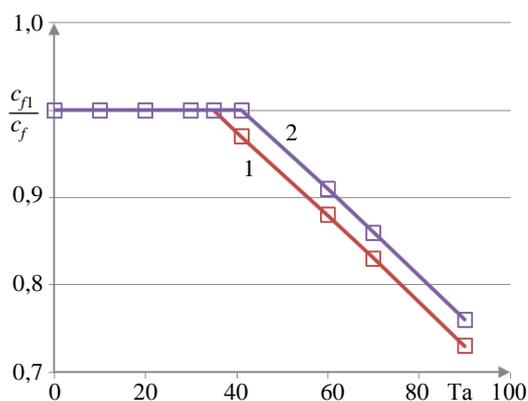


Рис. 9. Зависимость эффективности добавок однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от числа Тейлора: 1 – ММт-40 + 0,01 % ОУНТ; 2 – МВ-32 + 0,01 % ОУНТ

Fig. 9. The dependence of the efficiency of additives of single-layered carbon nanotubes (SLCN) on the number of Taylor: 1 – ММт-40 + 0,01 % SLCN; 2 – МВ-32 + 0,01 % SLCN

ВЫВОДЫ

1. Внешним магнитным полем в магнитной жидкости можно позиционировать немагнитные однослойные углеродные нанотрубки.

2. Добавки в магнитную жидкость однослойных углеродных наночастиц приводят к снижению трения при вихревом течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами при средних температурах в зазоре до 60 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. М.: Химия, 1989. 240 с.
2. Лабкович, О. Н. Влияние углеродных наночастиц на эффективную вязкость магнитных жидкостей / О. Н. Лабкович, Л. В. Сулоева, В. А. Чернобай // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. трудов II всерос. науч. конф. Ставрополь: Ставроп. гос. ун-т, 2009. С. 139–142.

3. Харрис, П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
4. Елецкий, А. В. Механические свойства углеродных нанотрубок и материалов на их основе / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 225–261.
5. Раков, Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. М.: Логос, 2006. 376 с.
6. Кашевский, Б. Э. Магнито-реологический эффект в суспензии с активной несущей жидкостью / Б. Э. Кашевский, В. И. Кордонский, И. В. Прохоров // Магнитная гидродинамика. Нью-Йорк, 1988. Т. 24, № 1. С. 30–35.
7. Frene, J. Detection of Taylor Vortex Transition in Very Small Clearances by Hot Film Anemometry / J. Frene, V. Godef // Tribology. 1973. Vol. 6, No 5. P. 178–183.
8. Ли, С. Влияние переменных плотности и вязкости на изменение режима течения между двумя концентрическими вращающимися цилиндрами / С. Ли // Проблемы трения. Сер. Ф. 1978. Т. 100, № 2. С. 261–270.
9. Кашевский, Б. Э. Куэтовское течение магнитной жидкости с переменными коэффициентами: вязкие напряжения, разогрев, устойчивость / Б. Э. Кашевский, В. А. Новиков // Магнитная гидродинамика. Нью-Йорк, 1986. Т. 22, № 4. С. 366–372.
10. Лэндал, М. Т. Влияние добавок на динамику турбулентных выбросов / М. Т. Лэндал // Снижение вязкого трения: сб. докл. симпозиума. М.: Машиностроение, 1984. С. 312–325.
11. Симоненко, А. П. Турбулентное течение водных растворов мицеллообразующих ПАВ в зазоре между коаксиальными цилиндрами / А. П. Симоненко // Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 38, № 2. С. 231–234.

Поступила 27.06.2016 Подписана в печать 29.08.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Berkovsky B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. (1989) *Magnetic Fluids*. Moscow, Khimiya Publ. 240 (in Russian).
2. Labkovich O. N., Suloyeva L. V., Chernobai V. A. (2009) The Effect of Carbon Nanoparticles on the Effective Viscosity of Magnetic Fluids. *Fiziko-Khimicheskie i Prikladnye Problemy Magnitnykh Dispersnykh Nanosistem: Sb. Nauch. Tr. II Vseros. Nauch. Konf.* [Physical and Chemical and Applied Problems of Magnetic Disperse Nanosystems. Collected Works of the IInd All-Russian Scientific Conference]. Stavropol, Stavropol State University, 139–142 (in Russian).
3. Harris P. (2003) *Carbon Nanotubes and Related Structures. New Materials of the XXIst Century*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 336 (in Russian).
4. Eletsii A. V. (2007) Mechanical Properties of Carbon Nanostructures and Related Materials. *Physics-Uspokhi*, 177 (3), 225–261. DOI: 10.1070/PU2007v050n03ABEH006188.
5. Rakov E. G. (2006) *Nanotubes and Fullerenes*. Moscow, Logos Publ. 376 (in Russian).
6. Kashevskii B. E., Kordonskii V. I., Prokhorov I. V. (1988) Magnetorheological Effect in a Suspension with an Active Carrier Fluid. *Magnetohydrodynamics, New York*, 24 (1), 30–35.
7. Frene J., Godef V. (1973) Detection of Taylor Vortex Transition in Very Small Clearances by Hot Film Anemometry. *Tribology*, 6 (5), 178–183. DOI: 10.1016/0041-2678(73)90144-9.
8. Li S. (1978) The Influence of Variable Density and Viscosity on flow Transition between Two Concentric Rotating Cylinders. *Journal of Lubrication Technology. Transactions of the ASME. Ser. F*, 100 (2), 261–270. DOI: 10.1115/1.3453159.
9. Kashevskii B. E., Novikov V. A. (1986) Couette Flow of a Magnetic Liquid with Variable Parameters: Viscous Stresses, Heating and Stability. *Magnetohydrodynamics, New York*, 22 (4), 366–372.
10. Lendal M. T. (1984) Influence of Additives on the Dynamics of Turbulent Emissions. *Reducing Viscous Friction. Collected Presentations Symposium*. Moscow, Mashinostroenie, 312–325 (in Russian).
11. Simonenko A. P. (1980) Turbulent Flow of Aqueous Solutions of Surfactants Forming Micelles in the Gap between Coaxial Cylinders. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 38 (2), 231–234 (in Russian).

Received: 27 June 2016

Accepted: 29 August 2016

Published online: 30 May 2017