

УДК 621.892

Оригинальная статья

О природе аномально высокого значения предела текучести наноструктурированной магнитной жидкости

А.Н. Болотов, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.592

Аннотация. На основе магнитных жидкостей реализованы новые эффективные технические устройства, такие как магнитожидкостные подшипники, уплотнения, демпферы. Магнитовязкий эффект может не только улучшить свойства магнитожидкостных узлов, но значительно усложнить их эксплуатацию после продолжительной остановки. Имеется в виду так называемый «стоп-эффект», который возникает из-за аномально высокого предельного напряжения сдвига в структурированной жидкости. Показано, что, опираясь на существующие представления о тиксотропных свойствах магнитной жидкости, не представляется возможным убедительно объяснить опытное значение предела текучести. Оценочные расчеты по известным формулам, полученным для цепочечной модели, дают существенно заниженное значение предела текучести реальной магнитной жидкости. Предложена гипотеза, согласно которой в процессе структурообразования в магнитных жидкостях происходит изменение реологических свойств несущей среды под действием сжимающих напряжений, создаваемых сеткой из дисперсных частиц. Эксперименты подтвердили увеличение плотности магнитной жидкости, находящейся в магнитном поле под влиянием таких напряжений. Можно предположить, что высокое значение предела текучести объясняется наличием собственного предела текучести дисперсионной среды, находящейся в квазитвердом состоянии.

Ключевые слова: магнитная жидкость, предел текучести, дисперсные частицы, магнитное взаимодействие, цепочечная модель.

1. Введение

Одной из основных особенностей магнитных жидкостей (МЖ) является их способность изменять свои реологические свойства под действием внешнего магнитного поля. Первоначально в теории магнитовязкого эффекта в МЖ [1, 2] рассматривали предельно разбавленные дисперсии, в которых взаимодействием между частицами пренебрегали. Максимальный рост вязкости МЖ под действием поля, предсказываемый этими моделями, не превышает нескольких процентов. Между тем, эксперименты, выполненные в последние годы, показали, что многие магнитные жидкости проявляют сильный магнитовязкий эффект. Рост их вязкости под действием поля достигает нескольких десятичных порядков [3, 4]. Особо сильный магнитовязкий эффект наблюдается при ориентации поля вдоль направления градиента скорости течения МЖ. Исследования показали, что такие сильные магнитовязкие эффекты могут быть связаны с присутствием больших агрегатов феррочастиц, объединенных силами магнитного взаимодействия [4-6]. Известно два

типа агрегатов, формирующихся в МЖ: в виде линейных цепочек и капель, образованных большим числом феррочастиц [5-8]. Однозначного ответа на вопрос об условиях формирования цепочечных или капельных агрегатов в настоящее время нет. Вместе с тем анализ показывает, что сильные магнитореологические эффекты могут вызывать агрегаты обоих типов [8].

Проявление магнитовязкого эффекта в магнитожидкостных узлах триботехнического назначения приводит к очень высокому моменту трения при страгивании («стоп-эффект» [9]) и поэтому негативно влияет на их работу и ограничивает область применения. Например, по этой причине снижается точность прецизионных измерительных приборов, повышается неустойчивость движения космических и других объектов, возникает необходимость использования высокомоментных приводных электродвигателей. Очевидно, что аномально большое статическое трение является результатом магнитоактивированных процессов структурообразования в МЖ, но механизм этого процесса остается непонятным в деталях [1-2, 9]. Известные способы снижения трения сводятся к предварительному разрушению структуры в МЖ с помощью вибрации или повышенной температуры, но их реализация не всегда возможна из-за усложнения конструкции узлов и необходимости подвода энергии.

Методические аспекты экспериментальных исследований и установленные опытным путем закономерности реологии МЖ в сильно структурированном состоянии рассмотрены нами в работе [10]

Цель настоящего этапа исследований сводилась к установлению механизма внутреннего трения в магнитной жидкости, находящейся в высокоструктурированном состоянии.

2. Анализ природы высокой прочности структурной сетки в магнитной жидкости

Магнитная жидкость относится к лиофобным дисперсным системам, которые седиментационно и агрегативно устойчивы в отсутствии магнитных полей [11]. Коллоидная устойчивость системы достигается путем создания структурно-механического барьера, препятствующего сближению частиц до расстояния, соответствующего глубокому минимуму потенциальной энергии их взаимодействия. Этот фактор обусловлен особой ориентированной структурой адсорбционно-сольватных слоев, образованных на поверхности частиц дисперсной фазы.

Электромагнитные силы, нарушающие коллоидную стабильность МЖ, вызваны молекулярным и магнитостатическим взаимодействием частиц дисперсной фазы, а также молекулярным взаимодействием концевых метильных групп адсорбированных молекул. В случае отсутствия внешнего магнитного поля магнитостатическая энергия

взаимодействия частиц равна:

$$U_m = -\frac{\mu_0 m^4}{12\pi r^3 kT}, \quad (1)$$

где m – магнитный момент частиц, r – расстояние между частицами, μ_0 – магнитная постоянная, k – постоянная Больцмана. Величина магнитостатической энергии, определенная по формуле (1), значительно меньше энергии теплового движения. Расчеты показывают, что лиофобная коллоидная система сохраняет устойчивость до тех пор, пока энергия притяжения не превышает энергию коагуляции, равную $\sim 10kT$. Значит, в коллоидно стабильных МЖ без воздействия магнитного поля энергия межчастичного притяжения U_m меньше энергии коагуляции $U_m < 10kT$.

В сильном магнитном поле магнитные моменты частиц направлены вдоль поля, и энергия их взаимодействия равна:

$$U_m = -\frac{\mu_0 m^2}{2\pi r^3}. \quad (2)$$

С учетом толщины адсорбционно-сольватного слоя, равного ~ 2 нм для частиц магнетита с диаметром меньше 10 нм, энергия магнитостатического взаимодействия не превышает критическое значение, и образование агрегатов не должно наблюдаться. Однако анализ дисперсного состава реальных МЖ показывает статистический разброс частиц по размерам и закономерное присутствие частиц с диаметром более 10 нм. Межчастичные связи, образованные с участием крупных частиц, не могут быть разрушены тепловым движением частиц.

Седиментационная устойчивость МЖ нарушается в том случае, если во внешнем магнитном поле $\mu_0 mH \gg kT$. Для многих технических устройств с МЖ характерны высоконеоднородные поля с индукцией до 1 Тл. В таких полях даже жидкости с размерами частиц в несколько нанометров (для которых еще сохраняются физические условия высокой намагниченности) будут содIMENTационно неустойчивы.

Таким образом, под воздействием достаточно больших магнитных полей в МЖ должны протекать процессы коагуляции. Последствием коагуляции может быть либо расслоение коллоидной системы с образованием осадка из магнитных частиц, либо образование тиксотропной (связано дисперсной) системы, в которой агрегирование частиц приводит к образованию сплошной пространственной сетки.

Практическое значение имеют только МЖ, способные образовывать пространственные тиксотропные структуры. Для таких жидкостей и получены вышеприведённые экспериментальные результаты. Заметим, что в средних полях устойчивой может быть МЖ, содержание дисперсной фазы, в которой менее 1 % и это недостаточно для образования

пространственной структуры. Однако намагниченность J_s таких МЖ слишком низкая: $J_s \approx 1 \div 5$ кА/м.

Наиболее простой моделью структурированной МЖ, получившей благодаря этому распространение, является модель, согласно которой структура образована цепочками из дисперсных частиц, расположенных вдоль силовых линий магнитного поля. Предполагая, что основной вклад в межчастичное взаимодействие вносят магнитные силы, можно получить [12] выражение для расчёта предельного напряжения сдвига для МЖ, находящейся в однородном магнитном поле:

$$\tau_s \approx \frac{2\mu_0 J_s^2}{\pi^2}. \quad (3)$$

Однако экспериментальные значения τ_s при воздействии на МЖ неоднородного магнитного поля получаются более чем на порядок выше расчётных. Так, расчёт по приведенной формуле (3) для исследованной МЖ дает значение τ_s , заниженное в $40 \div 60$ раз по сравнению с экспериментальными величинами τ_s [10]. По смыслу предельное напряжение сдвига для МЖ τ_s соответствует критическому значению напряжения τ_k , при котором равновесная скорость скольжения образца начинает нелинейно возрастать в результате разрушения структуры ($\tau_s \approx \tau_k$). Критическое напряжение имеет более ясный физический смысл и определяется однозначно [10].

Полученное отклонение можно объяснить перераспределением концентрации частиц в неоднородном поле. Проведенные исследования по изменению концентрации частиц в полях с градиентом $2 \cdot 10^7$ А/м² показали ее увеличение в $1,3 \div 1,4$ раза. Это не изменяет существенно величину τ_s .

Другое объяснение может состоять в том, что при расчёте необходимо учитывать межмолекулярные силы, но они малы по сравнению с магнитными силами, даже когда во внешнем поле среднее расстояние между частицами уменьшается. В противном случае осадок, полученный после коагуляции седиментационно неустойчивой МЖ, должен иметь высокое значение предельного напряжения сдвига за счет увеличения молекулярных, да и магнитных сил. Эксперименты показали, что в этом случае τ_s в несколько раз ниже, чем у тиксотропной МЖ, содержащей такое же количество дисперсной фазы. Остается непонятным, какими причинами объясняется высокое значение напряжения разрушения тиксотропной структуры МЖ.

В связи с рассмотрением существующих представлений о структуре и свойствах тиксотропного состояния МЖ возникает и другой вопрос. Какие факторы стабилизации препятствуют уплотнению цепочек частиц в

неоднородном поле? На каждую дисперсную частицу, например, в магнитожидкостном уплотнении, действует магнитная сила порядка 10^{-17} Н, направленная по градиенту магнитного поля. Результирующая сила, действующая в этом направлении на частицу, может превосходить ее на $5 \div 7$ порядков в результате аддитивного наложения сил со стороны других частиц и расположенных в меньшем по величине магнитном поле. Энтропийный фактор не может играть определяющей роли, поскольку энергия магнитного взаимодействия, равная $10^{-19} \div 10^{-20}$ Дж, в $10 \div 100$ раз превышает тепловую энергию. Сближению цепочек могут препятствовать магнитные силы отталкивания между ними и стерические силы взаимодействия адсорбционно-сольватных оболочек. Первые силы обусловлены взаимодействием параллельных диполей и убывают по мере уплотнения частиц в цепочках. Стерические силы существенны только на расстояниях между частицами порядка нескольких нанометров. Анализ баланса сил показывает, что расстояние между частицами должно быть меньше среднестатистического расстояния между частицами вне поля. Значит, в магнитном поле в результате уплотнения цепочек следует ожидать отделение дисперсной среды, что противоречит опыту.

Логично предположить, что коагуляция МЖ приводит к образованию более сложной трехмерной структуры в виде сетки частиц дисперсной фазы, узлы которой заняты более крупными частицами, а ячейки сетки заполнены дисперсионной средой. Анизотропия физических свойств структурированной МЖ объясняется тем, что ячейки сетки вытянуты вдоль поля. Один из возможных вариантов такой структуры показан на рис. 1. Магнитный момент межузельных частиц под действием поля узловых частиц может несколько отклоняться от направления внешнего поля.

Приведённая структура, казалось бы, не является коагуляционно устойчивой и должна постепенно сжиматься в область с максимальным полем и вытеснять дисперсную среду из ячеек. Было сделано следующее предположение, что дисперсионная среда не может вытекать из ячеек и поэтому сжатию структурной сетки препятствуют гидростатические силы.

Оценочные расчеты, выполненные для отдельной ячейки эллипсоидальной формы с характерным размером 10^{-6} м, показали, что давление в ней может достигать $0,1 \div 1$ МПа только за счет действия магнитных сил.

Упрощённо структурную сетку из дисперсионных частиц можно представить в виде некоторого элементарного объема, окруженного многослойной эластичной оболочкой. Понятно, что давление в элементарном объеме равно сумме давлений, создаваемых всеми оболочками. По аналогии давление в ячейках структурной сетки МЖ

должно возрастать по мере приближения к области с максимальным полем и может значительно превосходить (на несколько порядков, исходя из размеров ячеек) давление в изолированной ячейке.

Все вещества в жидком состоянии имеют большой свободный объем ($2\div 3\%$), не занятый молекулами, и поэтому при сжатии их плотность меняется, причём на $2\div 3$ порядка быстрее, чем у твёрдых тел.

3. Дополнительные контрольные исследования

Экспериментальным подтверждением предположения о том, что дисперсная среда находится в состоянии всестороннего сжатия, может служить изменение плотности в процессе структурообразования. Такие измерения были выполнены методом гидростатического взвешивания. Суть метода заключается во взвешивании фиксированного объема МЖ вначале на воздухе, затем в жидкой среде. Относительное изменение плотности вещества ρ и его объема V равны между собой и не зависят от жидкости, в которую помещается исследуемое вещество:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta m}{m_1 - m_2}, \quad (4)$$

где m_1 – показания прибора при взвешивании в воздухе, m_2 и Δm – показания прибора и их изменения при взвешивании в жидкости. Исходя из этого МЖ должна помещаться вместе с источником поля в сосуд, заполненный жидкостью, с которой она не смешивается, и в процессе структурообразования необходимо производить ее гидростатическое взвешивание.

Исследуемая МЖ взвешивалась гидростатическим методом в обезгаженной воде, которую специально насыщали компонентами этой МЖ. Поле создавалось магнитом из сплава железо - бор с остаточной магнитной индукцией около 1,2 Тл (индукция около поверхности отдельного магнита около 0,5 Тл). Измерения производились на аналитических весах, выполненных из немагнитных материалов. Абсолютная ошибка взвешивания 0,1 мг.

Предварительные опыты выявили две причины возможных существенных ошибок эксперимента. Во-первых, образование и закрепление пузырьков воздуха на поверхности взвешиваемых тел после погружения в жидкость, а также в объеме МЖ. Влияние этого фактора устранялось путем строгого контроля условий проведения опытов. Во-вторых, обнаружилось увеличение плотности МЖ в результате слабого взаимодействия с водой (приблизительно на 1 мг/см^3). Изменения протекали интенсивно только в первые несколько часов и затрагивали тонкий поверхностный слой. Исходя из этого МЖ помещалась в сосуд с удлиненным горлышком малого сечения и перед измерениями

с неустойчивой МЖ, вообще не показали надежного изменения плотности. Этого следовало ожидать, если учесть, что упругость адсорбированных слоев сравнима с упругостью твёрдых тел [12].

Рассмотрим, не противоречит ли возможность сильного сжатия дисперсионной среды закону сохранения энергии. Увеличение упругой энергии дисперсионной среды происходит за счет убыли потенциальной энергии магнитостатического взаимодействия частиц. Упругая энергия, запасенная дисперсионной средой, определяется следующим образом:

$$W_e = \frac{\beta \Delta V^2}{2V}. \quad (5)$$

где β – коэффициент объемного сжатия. Магнитостатическая энергия намагниченной до насыщения МЖ равна:

$$W_m = \mu_0 J_s^2 V. \quad (6)$$

Необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$\mu_0 J_s^2 \Delta V > \frac{\beta \Delta V^2}{2V}. \quad (7)$$

Например, для исследуемой МЖ модуль сжатия $\beta \approx 10^9$ Н/м², $J_s = 3 \cdot 10^4$ А/м при напряжённости поля $H = 2 \cdot 10^5$ А/м и $V = 5 \cdot 10^{-6}$ м изменение объема $\Delta V = 5 \cdot 10^{-9}$ м³. Оценочные расчёты с приведенными исходными данными по формулам (5) и (6) показывают, что магнитостатическая энергия превышает упругую, неравенство (7) выполняется, и значит, процесс сжатия энергетически возможен.

Таким образом, все приведённые данные позволяют с большой вероятностью утверждать, что дисперсионная среда в структурированной МЖ находится в состоянии всестороннего сжатия. Появляющиеся в результате этого упругие силы выступают в роли одного из составных факторов стабилизации структуры МЖ. В рамках цепочечной модели коллоидной структуры МЖ невозможно объяснить существенное сжатие дисперсионной среды, т. к. давление в межцепочечном объеме не превышает 10^4 Па.

На основании сделанных выводов предоставляется возможным высказать предположение (гипотезу) о причине высокого значения напряжения разрушения структуры МЖ. Из приведённых экспериментальных данных следует, что среднее давление в дисперсионной среде ≈ 10 МПа. В неоднородных полях наибольшее давление достигается в области, где поле максимально. Исходя из закона сохранения энергии, давление в околоразрывной зоне магнитопровода может превышать 100 МПа. Для таких давлений происходит переход жидкости в квазитвердое состояние или даже ее стеклование и жидкость приобретает неньютоновские свойства. В работе [13] показано, что при

давлениях выше давления стеклования вещество имеет отчётливо выраженный предел текучести и сравнительно высокую пластичность. Например, для полифенилового эфира предел текучести при температуре 273 К около 28 МПа и снижается до 15 МПа при 300 К. Поэтому, вполне возможно, что высокое напряжение разрушения структуры объясняется радикальным изменением реологических свойств дисперсионной среды, т. е. наличием у сжатой жидкости собственного предела текучести.

В работе [10] показано, что при повышении температуры резко снижается критическое значение напряжения сдвига. Такую зависимость затруднительно объяснить температурным изменением магнитных или молекулярных сил взаимодействия частиц. В рассматриваемом диапазоне температур магнитные силы зависят от температуры приблизительно линейно, а молекулярные еще слабее [14]. В тоже время зависимость реологических свойств сжатой жидкости от температуры близка к экспоненциальной. Поэтому полученные данные [10] косвенно подтверждают существенную роль сжатой дисперсионной среды в формировании критического напряжения сдвига.

Таким образом, гипотеза о наличии у дисперсионной среды МЖ собственных неньютоновских свойств имеет достаточно убедительное косвенное подтверждение.

4. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования реологических свойств магнитной жидкости в сильно неоднородных магнитных полях. После завершения процесса структурирования МЖ в магнитном поле она приобретает ярко выраженные неньютоновские свойства. Предел текучести структурированной МЖ имеет аномально высокое значение. К разрушению структуры приводят сдвиговые деформации в МЖ. Опираясь на существующие представления о тиксотропных свойствах МЖ не представляется возможным объяснить опытное значение предела текучести. Оценочные расчеты по известным формулам, полученным для цепочечной модели МЖ дают существенно заниженное значение предела текучести реальной МЖ. Предложена гипотеза, согласно которой в процессе структурообразования в МЖ происходит изменение реологических свойств несущей среды под действием сжимающих напряжений, создаваемых сеткой из дисперсных частиц. Эксперименты подтвердили увеличение плотности МЖ, находящейся в магнитном поле под влиянием таких напряжений. Зная относительное изменение объема МЖ в магнитном поле, была выполнена оценка величины сжимающих напряжений. Полученное значение напряжений соответствует нижнему уровню напряжений, при которых жидкость переходит в квазитвердое

состояние и сжатое вещество приобретает неньютоновские свойства. Именно наличием у дисперсионной среды собственного предела текучести можно объяснить аномальное интегральное значение предела текучести МЖ.

Библиографический список:

1. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа. 1988. – 184 с.
2. **Берковский, Б.М.** Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
3. **Odenbach, S.** Magnetoviscous effects in ferrofluids / S. Odenbach, S. Thurm // In series: Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2002. – V. 594. – P. 185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
4. **Pop, L.M.** Investigation of the microscopic reason for the magnetoviscous effect in ferrofluids studied by small angle neutron scattering / L. M. Pop, S. Odenbach // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2006. – V. 18. – № 38. – P. 2785-2802. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/S17.
5. **Odenbach, S.** Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids / S. Odenbach // In series: Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2009. – V. 763. – X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
6. **Zubarev, A.Yu.** Rheological properties of ferrofluids with microstructures / A.Yu. Zubarev, L.Yu. Iskakova // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2006. – V. 18. – № 38. – P. S2771-S2784. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/S16.
7. **Pop, L.M.** Microstructure and rheology of ferrofluids/ L.M. Pop, S. Odenbach, A. Wiedenmann, N. Matoussevitch // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2005. – V. 289. – P. 303-306. DOI:10.1016/j.jmmm.2004.11.086.
8. **Richardi, J.** Low density mesostructures of confined dipolar particles in an external field / J. Richardi, J.J. Weis // The Journal of Chemical Physics. – 2011. – V. 135. – I. 12. – P. 124502-1124502-10. DOI: 10.1063/1.3638048.
9. **Тюкавин, Р.Н.** Магнитожидкостные герметизаторы для космической техники / Р.Н. Тюкавин, А.В. Марковин, С.В. Рулёв и др. – Режим доступа: [www.url: https://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm](https://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm). – 15.02.2023.
10. **Болотов, А.Н.** Экспериментальное изучение текучести наноструктурированной магнитной жидкости в сильном магнитном поле / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 692-700. DOI 10.26456/pcascnn/2023.15.692.
11. **Щукин, Е.Д.** Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М.: Высшая школа, 2004. – 445 с.
12. **Ахматов, А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
13. **Alsaad, M.** Glass transitions in lubricants: its relation to elastohydrodynamic lubrication (EHD) / M. Alsaad, S. Bair, D. M. Sanborn, W. O. Winer // Journal of Lubrication Technology. – 1978. – V. 100. – I. 3. – P. 404-416. DOI: 10.1115/1.3453197.
14. **Вонсовский, С.В.** Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

References:

1. Fertman V.E. *Magnitnye zhidkosti: spravocnoe posobie* [Magnetic fluids]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1988, 184 p. (In Russian).
2. Berkovskij B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnyye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Khimiya, 1989, 240 p. (In Russian).
3. Odenbach S., Thurm S. Magnetoviscous effects in ferrofluids, *Lecture Notes in Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, vol. 594, pp.185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
4. Pop L.M. Investigation of the microscopic reason for the magnetoviscous effect in ferrofluids studied by small angle neutron scattering, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, vol. 18, no. 38, pp. 2785-2802. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/S17.
5. Odenbach S. Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids, *Lecture Notes in*

- Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, vol. 763, X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
6. Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. Rheological properties of ferrofluids with microstructures, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, vol. 18, no. 38, pp. S2771-S2784. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/S16.
7. Pop L.M., Odenbach S., Wiedenmann A., Matoussevitch N. Microstructure and rheology of ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, vol. 289, pp. 303-306. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.11.086.
8. Richardi J., Weis J.J. Low density mesostructures of confined dipolar particles in an external field, *The Journal of Chemical Physics*, 2011, vol. 135, issue 12, pp. 124502-1124502-10. DOI: 10.1063/1.3638048.
9. Tyukavin R.N., Markovin A.V., Rulyov S.V. et al. Magnitozhidkostnye germetizatory dlya kosmicheskoy tekhniki [Magnetofluidic sealants for space technology]. Available at: <https://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm> (accessed 15.02.2023). (In Russian).
10. Bolotov A.N., Novikova O.O. Eksperimental'noye issledovaniye tekuchesti nanostrukturirovannoy magnitnoy zhidkosti v sil'nom magnitnom pole [Experimental study of the fluidity of nanostructured magnetic fluid in a strong magnetic field], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2023, issue 15, pp. 692-700. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692. (In Russian).
11. Shchukin Ye.D., Pertsov A.V., Amelina Ye.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004, 445 p. (In Russian).
12. Akhmatov A.S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* [Molecular physics of boundary friction]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 472 p. (In Russian).
13. Alsaad M., Bair S., Sanborn D.M., Winer W.O. Glass transitions in lubricants: its relation to elastohydrodynamic lubrication (EHD), *Journal of Lubrication Technology*, 1978, vol. 100, issue 3, pp. 404-416. DOI: 10.1115/1.3453197.
14. Vonsovskiy S. V. *Magnetizm* [Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 1032 p. (In Russian).

Original paper

On the nature of anomalously high value of yield stress of nanostructured magnetic fluid

A.N. Bolotov, O.O. Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.592

Abstract: Based on magnetic fluids, new effective technical devices have been implemented, such as magnetic fluid bearings, seals, and dampers. The magnetic-viscous effect inherent in magnetic fluids can not only improve the properties of magnetic fluid units, but significantly complicate their operation after a long stop. This refers to the so-called «stop effect», which occurs due to an abnormally high limiting shear stress in a structured liquid. It is shown that, based on the existing ideas about the thixotropic properties of a magnetic fluid, it is not possible to convincingly explain the experimental value of the yield strength. Estimations according to the known formulas obtained for the chain model give a significantly underestimated value of the yield strength of a real magnetic fluid. A hypothesis is proposed according to which the rheological properties of the carrier medium change in the process of structure formation in the magnetic fluid under the action of compressive stresses created by a network of dispersed particles. Experiments have confirmed an increase in the density of the magnetic fluid in the magnetic field under the influence of such stresses. It can be assumed that high values of the yield strength are due to the presence of the intrinsic yield strength of the dispersion medium, which is in a quasi-solid state.

Keywords: *magnetic fluid, yield point, dispersed particles, magnetic interaction, chain model.*

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 24.03.2024; после рецензирования/revised: 17.04.2024; принята/accepted 20.04.2024.