УДК 536.242

**К ВОПРОСУ О ВЯЗКОСТИ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ
МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ****Яновский А.А., Рубачев В.В.***ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», Ставрополь,
e-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru*

Объектом исследования в настоящей работе является вязкость и теплопроводность магнитной жидкости. Рассмотрены различные подходы к расчету эффективной вязкости. Представлены данные о теплопроводности магнитной жидкости. Описан принцип работы экспериментальной установки для исследования теплообмена в кипящей магнитной жидкости. Рассмотрена методика проведения экспериментов и показана необходимость учета расчетных значений вязкости и теплопроводности магнитных жидкостей. Показано, что наличие твердой фазы в магнитной жидкости приводит к увеличению ее теплопроводности. Полученные подходы и методика изучения теплообмена легла в основу разрабатываемого прибора для охлаждения поверхности центрального процессора. Охлаждение поверхности при этом происходит с помощью реализации принципа термомагнитной конвекции, реализуемого в магнитной жидкости неоднородно нагретой по слоям при действии внешнего неоднородного магнитного поля.

Ключевые слова: магнитная жидкость, нанокolloид, теплоемкость, теплопроводность, теплотехнические приборы, кипение, охлаждение поверхности

**ON THE QUESTION OF VISCOSITY AND THE THERMOPHYSICAL
PROPERTIES OF MAGNETIC LIQUIDS****Yanovskii A.A., Rubachev V.V.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Stavropol State Agrarian
University, Stavropol, e-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru*

The object of investigation in this work is the viscosity and thermal conductivity of a magnetic fluid. Various approaches to the calculation of effective viscosity are considered. Data on the thermal conductivity of a magnetic fluid are presented. The operating principle of the experimental apparatus for studying heat transfer in a boiling magnetic liquid is described. The technique of carrying out the experiments is considered and the necessity of taking into account the calculated values of the viscosity and thermal conductivity of magnetic liquids is shown. It is shown that the presence of a solid phase in a magnetic fluid leads to an increase in its thermal conductivity. The obtained approaches and the method of studying heat exchange became the basis for the developed device for cooling the surface of the central processor. Cooling of the surface in this case occurs through the implementation of the principle of thermomagnetic convection, realized in a magnetic fluid inhomogeneously heated over layers under the action of an external non-uniform magnetic field.

Keywords: magnetic fluid, nanocolloid, heat capacity, thermal conductivity, heat engineering devices, boiling, surface cooling

К настоящему времени вполне апробированы технические устройства (муфты, тормоза, амортизаторы, управляемые магнитным полем), в которых магнитные жидкости используются в качестве рабочего тела [4]. Но данные механизмы работают при температуре 60-80 °С, поэтому важно знать, как поведет себя магнитная жидкость при еще большем росте температуры, в том числе, когда начинаются процессы кипения [5, 6, 7-10]. Для этого необходимо рассчитывать значения эффективной вязкости, теплоемкости и теплопроводности магнитных жидкостей.

В ранних работах температурная зависимость вязкости магнитных жидкостей, которые были первоначально разбавлены, считалась эквивалентной зависимости вязкости жидкости-носителя от температуры. Это было связано с первой физической моделью магнитной жидкости, которая описывала поведение жидкого магнетика с независимой от величины поля вязкостью.

Однако не были учтены важные моменты. Во-первых, в жидкой основе растворён некоторый объём поверхностно-активного вещества, «искажающего» ее переносные свойства. Во-вторых, вязкость магнитной жидкости зависит от ряда механизмов трения, которых нет в однородной жидкости. Их влияние на эффективную вязкость, в свою очередь тоже зависит от температуры. Угловая скорость каждой частицы равна нулю и действующий момент сил трения изменяет слой поверхностно-активного вещества. Таким образом зависимость вязкости от температуры магнитной жидкости в магнитном поле становится ближе к температурной зависимости вязкости ПАВ, чем при течении в отсутствие магнитного поля.

Опыты по измерению вязкости [4] подтвердили высказанные выше соображения: зависимость вязкости от температуры, которая соответствует линейному для концентрированных магнитных жидкостей отличается от температурной зависимости

вязкости среды-носителя. Вязкость магнитной жидкости на основе керосина в интервале температур $-40-30^\circ\text{C}$ может быть довольно удовлетворительно описываться формулой Андраде:

$$\eta_{\text{эф}} = B \exp\left(\frac{E}{RT}\right). \quad (1)$$

При измерении температурной зависимости вязкости близких по характеристикам магнитных жидкостей на основе керосина в интервале $t = 20-80^\circ\text{C}$ получены значения $E = 17,54$ кДж/моль, $B = 5,58 \cdot 10^{-3}$ МПа·с (З. Гропсиан (Z. Gropsian)). В таком же интервале температур вязкость олеиновой кислоты и керосина, выступающего в качестве среды-носителя, и описывается зависимостью (1) при $E_{\text{к}} = 12,74$ кДж/моль, $B_{\text{к}} = 8,45 \cdot 10^{-3}$ МПа·с и $E_{\text{о.к}} = 21,95$ кДж/моль, $B_{\text{о.к}} = 3,84 \cdot 10^{-3}$ МПа·с соответственно.

Анализ данных, которые получены для магнитных жидкостей, выявил достаточно выраженную зависимость E и B от уровня исследованного температурного интервала. Обычно, погрешность зависимости вязкости от температуры, которая выражается формулой (1) сильно увеличивается у границ. Это удается избежать при обработке экспериментальных данных зависимостью:

$$\eta_{\text{эф}} = B \exp\left(\frac{E}{T^n}\right) \quad (2)$$

В таком случае относительная погрешность оказывается в несколько раз ниже оставалась на уровне 2% в интервале $T = 290-350$ К температур. Для сравнения результатов следует формулу (1) преобразовать к виду:

$$\eta_{\text{эф}} = \eta_0 \exp\left(-\alpha \left(1 - \left(\frac{T_0}{T}\right)^n\right)\right) \quad (3)$$

где $\eta_0 = \eta(T_0)$; $\alpha = \ln K$ (K – отношение вязкостей $\eta_0/\eta(T \rightarrow \infty)$); T_0 – характерная температура; n – константа.

Из формул (2) и (3) можно получить значения для следующих величин, входящих в формулу:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= B \cdot \exp\left(\frac{E}{T_0^n}\right) \\ \alpha &= \ln \frac{\eta_0}{B} \\ B &= \eta_0 \cdot e^{-\alpha} \\ E &= \alpha T_0 \end{aligned} \quad (4)$$

При обработке известных данных вязкости с помощью соотношения (4) получены предельные значения для коэффициентов: $K = 3-20$; $n = 1-3,5$ при $T_0 \approx 293$ К. Магнитные жидкости со средней концентрацией твердой фазы без магнитного поля не проявляют неньютоновских свойств. При включении магнитного поля наблюдается зависимость вязкости и от температуры, и от величины скорости сдвиговой деформации.

Таким образом, в небольших полях оба механизма определяющие вязкость проявляются при одинаковых скоростях сдвиговой деформации и выделить действия этих механизмов по отдельности не представляется возможным. С ростом поля растут и скорости сдвиговой деформации, при которых отсутствует вращательная вязкость. Одновременно, та часть области γ , где агрегирование оказывает сильное влияние на течение, очень мала: $\gamma < 10^3 \text{с}^{-1}$. В больших полях ($H \sim 10^3$ А/м) и при высоких скоростях сдвиговой деформации ($\gamma > 10^3 \text{с}^{-1}$) позволяют определить температурную зависимость вращательной вязкости.

Наличие твердой фазы в магнитной жидкости приводит к увеличению теплопроводности, так как теплопроводности магнетита превышает на порядок теплопроводность жидкости-носителя. Известно, что при комнатной температуре теплопроводность магнетита $\lambda_{\text{м}}$, равен 10 Вт/(м·К), а масла всего лишь 0,13 Вт/(м·К). Сведения о влиянии магнитного поля на теплопроводность магнитных жидкостей в малых полях не обнаружено.

Вероятно, первая формула для вычисления теплопроводности коллоидов была получена Б.М. Тареевым (1940) по аналогии с расчетами в электрических полях:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{2\lambda_0 + \lambda_{\text{м}} - 2\varphi(\lambda_0 - \lambda_{\text{м}})}{2\lambda_0 + \lambda_{\text{м}} + \varphi(\lambda_0 - \lambda_{\text{м}})}, \quad (5)$$

где λ_0 и $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициенты теплопроводности жидкой фазы и твердой фазы.

Зависимость теплопроводности магнитной жидкости от температуры зависит от концентрацией твердой фазы, $\lambda_{\text{м}}(t)$ которая отличается от $\lambda_0(t)$ жидкой фазы. Обобщение известных экспериментальных данных говорит о том, что с увеличением температуры наблюдается линейное снижение коэффициента теплопроводности магнитных жидкостей. Так как, что температурные коэффициенты жидкой и твердой фаз отличаются, коэффициент теплопроводности магнитной жидкости с ростом температуры все

меньше отличается от λ_0 : от 30% при комнатной температуре до 17% при 90 °С.

Наши эксперименты по изучению влияния магнитных полей на теплообмен магнитных жидкостей учитывали, известные теплофизические подходы, описанные выше [4]. При этом методика эксперимента заключалась в следующем. Методика эксперимента по изучению влияния магнитного поля на теплообменные процессы магнитной жидкости на немагнитной пластине заключалась в следующем. На нагреватель подается напряжение, одновременно с этим включаются катушки, создающие магнитное поле определенной величины на теплоподводящей поверхности, его значение остается постоянным в ходе каждого отдельного эксперимента. Параллельно с этим происходит запись сигнала с термопар при помощи компьютера оснащенного платой аналого-цифрового преобразователя.

Термопары, установленные вдоль теплоподводящего стержня, регистрируют температуры T_1 и T_2 . Изменение температур в ходе процесса нагрева пластины и ее охлаждения магнитной жидкостью записываются при помощи программного комплекса. Этот эксперимент позволяет изучать теплообмен в магнитной жидкости при температуре кипения.

Список литературы

1. Влияние однородного магнитного поля на теплообмен при кипении магнитной жидкости на неограниченной

поверхности / Симоновский А.Я., Яновский А.А. // Наука. Инновации. Технологии. 2011. № 6-1. С. 272-278.

2. Игропуло В.С. Математическое моделирование некоторых ориентационных процессов на наноповерхностях / Игропуло В.С., Яновский А.А. // Обзорные прикладные и промышленной математики. 2008. т. 15. № 3. С. 484-485.

3. Козлова В.Р. Математическое моделирование процесса образования пузырька пара в магнитной жидкости / Козлова В.Р., Бородин Е.С., Яновский А.А., Симоновский А.А. // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-3. С. 386-387.

4. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: Справочное пособие. Минск: Высш. шк. 1988. 184 с.

5. Яновский А.А. Тепло- и массоперенос при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности с точечным подводом тепла // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 1289-1290.

6. Яновский А.А. Перспективы развития и моделирования систем охлаждения процессоров ПК с использованием магнитной жидкости в качестве охлаждающей среды / Яновский А.А., Симоновский А.Я., Хаустов П.А. // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-4. С. 498-499.

7. Яновский А.А. Теплообмен в кипящей магнитной жидкости / Яновский А.А., Симоновский А.Я., Холопов В.Л. // В сборнике: Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем V Всероссийская научная конференция с международным участием: сборник научных трудов. 2015. С. 276-282.

8. Яновский А.А. Моделирование отрыва пузырьков пара в кипящей магнитной жидкости / Яновский А.А., Симоновский А.Я., Холопов В.Л. // В сборнике: Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем V Всероссийская научная конференция с международным участием: сборник научных трудов. 2015. С. 239-246.

9. Яновский А.А. Влияние магнитного поля на процессы парообразования в кипящей магнитной жидкости / Яновский А.А., Симоновский А.Я., Холопов В.Л. // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-2. С. 332-337.

10. Яновский А.А. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров / Яновский А.А., Каныгин Я.В. // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-4. С. 496-498.