

01;03

## **Моделирование распределения электромагнитного поля сверхвысокой частоты и удельной поглощенной мощности в образце магнитной жидкости**

© С.С. Милкин, А.В. Стародубов, С.Б. Вениг

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: StarodubovAV@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 апреля 2014 г.

Приводятся результаты моделирования распределения электромагнитного поля сверхвысокой частоты, а также удельной поглощенной мощности в образце магнитной жидкости в зависимости от объемной концентрации включений. Расчет эффективных параметров гетерогенной системы проводится на основе феноменологических теорий гомогенизации среды Максвелла-Гарнетта и Бругемана.

Использование наночастиц магнетита [1] в качестве наполнителя, повышающего поглощательные свойства веществ, при их взаимодействии с СВЧ-излучением требует определения оптимальных концентраций наночастиц. Эффективность электромагнитного нагрева должна повышаться с ростом концентрации [2–4]. При этом для гетерогенной системы существует предельная концентрация, при которой система кардинальным образом меняет свои свойства. Это происходит тогда, когда хаотично расположенные частицы становятся способны образовать один непрерывный кластер, вызывая резкий скачок проводимости [5].

Основной задачей данной работы ставилось моделирование распределения электрических и магнитных полей в образце нанодисперсной магнитной жидкости при различных концентрациях включений с учетом предположений об эффективных параметрах среды с целью выявления особенностей ее взаимодействия СВЧ-излучением, а также определения оптимальных концентраций включений для наиболее эффективного процесса передачи энергии от СВЧ-излучения к образцу.

Для проведения моделирования распределения поля в гетерогенной системе (наночастицы магнетита, диспергированные в керосине

и стабилизированные олеиновой кислотой) в зависимости от объемной фракции частиц при взаимодействии ее с СВЧ-излучением необходимо наличие известных параметров диэлектрической проницаемости и проводимости. При этом система рассматривается как двухкомпонентная, с учетом того, что олеиновая кислота, используемая в качестве стабилизатора [6], близка по своим диэлектрическим свойствам к веществу матрицы — керосину. В качестве среды моделирования использовалось программное обеспечение HFSS фирмы Ansoft.

Требуемые параметры можно рассчитать, используя модели Максвелла–Гарнетта–Силларса [7,8] для диэлектрической проницаемости и Бруггемана [5] для проводимости. Модель Максвелла–Гарнетта–Силларса эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенной среды в ее модифицированном виде, учитывающем наличие взаимодействия между частицами, описывается выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{3\phi K_n}{1 - \phi K_n(1 + M)} \right),$$

где  $\varepsilon$  — эффективная диэлектрическая проницаемость гетерогенной среды,  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_m$  — диэлектрическая проницаемость частиц и матрицы соответственно,  $\phi$  — объемная концентрация частиц,

$$K_n = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_p + \varepsilon_m \frac{1+n}{n}},$$

$$M = b_1 K_5 \phi^{11/3} + c_1 K_7 \phi^5 - a \phi^{7/3} \frac{1 + c_2 K_5 \phi^{11/3} + c_3 K_5^2 \phi^{22/3}}{K_3^{-1} + b_2 \phi^{7/3} + c_4 K_5 \phi^6},$$

числовые константы  $a = 1.3045$ ,  $b_1 = 0.01479$ ,  $b_2 = 0.4054$ ,  $c_1 = 0.1259$ ,  $c_3 = 0.06993$ . Данное выражение позволяет получить значение эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенной системы, используя диэлектрические проницаемости ее составных частей, а также объемную концентрацию включений, и справедливо до концентраций включений порядка 45%.

Эффективную проводимость системы можно получить из модели Бруггемана, описываемой выражением:

$$\sigma = \frac{1}{4} \left[ (3p - 1)\sigma_1 + (2 - 3p)\sigma_2 + \sqrt{[(3p - 1)\sigma_1 + (2 - 3p)\sigma_2]^2 + 8\sigma_1\sigma_2} \right],$$

где  $\sigma_1$  — проводимость хорошо проводящих включений (наночастиц),  $\sigma_2$  — проводимость плохо проводящей матрицы (керосина),  $p$  — объемная концентрация частиц.

В случае сильной неоднородности, когда  $\sigma_1 \gg \sigma_2$ , в случайно неоднородной среде происходит перколяционный переход: вблизи порога протекания, т.е. такой концентрации, при которой в системе впервые образуется связный путь по хорошо проводящей фазе (бесконечный кластер), наблюдается резкое изменение поведения эффективной проводимости. Приближение самосогласованного поля Бруггемана хорошо описывает практически весь диапазон концентраций, давая прекрасное совпадение с численным счетом на сетках везде, кроме узкой области вблизи порога протекания. Используя 2 приведенные модели, а также характеристики исследуемой гетерогенной системы (диэлектрическая проницаемость керосина — 2.5, наночастиц магнетита — 10, проводимость керосина —  $3 \cdot 10^{-7} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , наночастиц магнетита —  $2 \cdot 10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ), были получены концентрационные зависимости эффективных параметров диэлектрической проницаемости и проводимости. Также было использовано предположение о неизменности значений диэлектрической проницаемости и проводимости в интересующем диапазоне частот от 300 kHz до 3 GHz.

В области концентрации включений порядка 30% наблюдается качественное изменение свойств гетерогенной системы, вызванное резким изменением ее проводимости. Для проведения моделирования был выбран ряд значений рассчитанной диэлектрической проницаемости и проводимости системы, соответствующие различным концентрациям включений. Значения выбирались таким образом, чтобы наглядно пронаблюдать изменение распределения электромагнитного поля в образце, связанное с качественным изменением свойств гетерогенной системы. Значения, используемые для моделирования, приведены в таблице.

Также было проведено моделирование величины удельной мощности поглощения в диэлектрическом теле для гетерогенной системы в зависимости от концентрации хорошо проводящих включений. По определению, величина удельной мощности, поглощаемой в объеме пространства, равна:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} [\text{W/kg}],$$

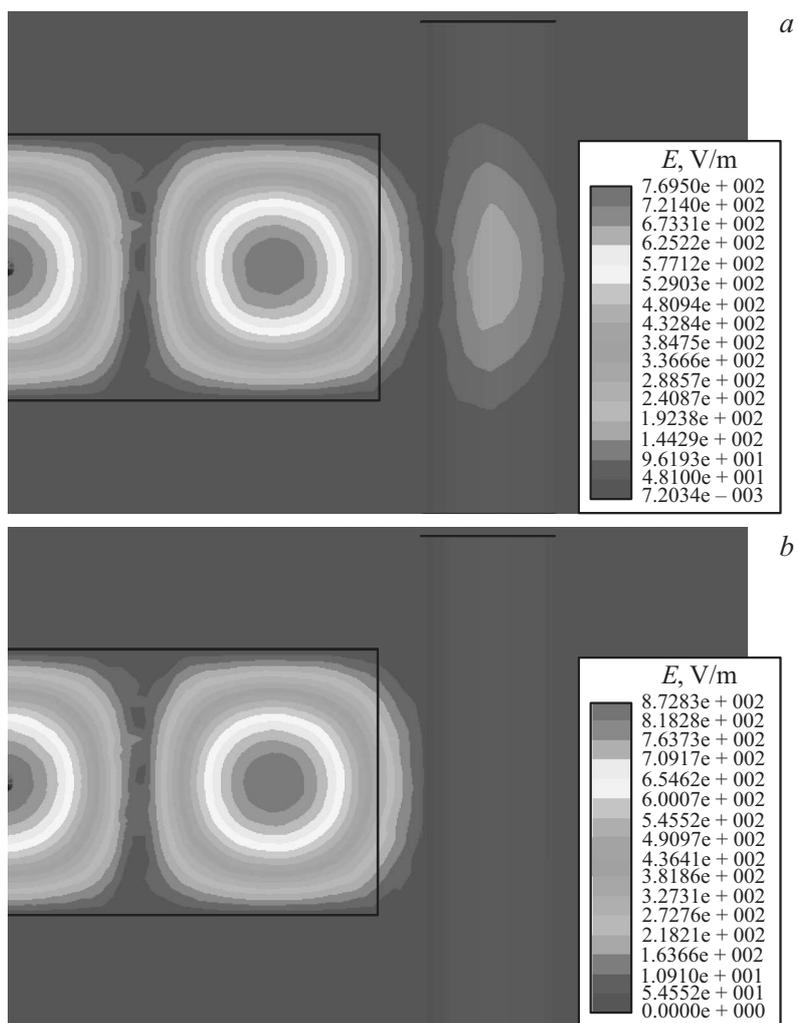
где  $\sigma$  — проводимость материала, S/m;  $E$  — напряженность поля, V/m;  $\rho$  — удельная плотность вещества, kg/m<sup>3</sup>. Моделируемая система при

Значения диэлектрической проницаемости и проводимости при различных значениях объемной концентрации включений

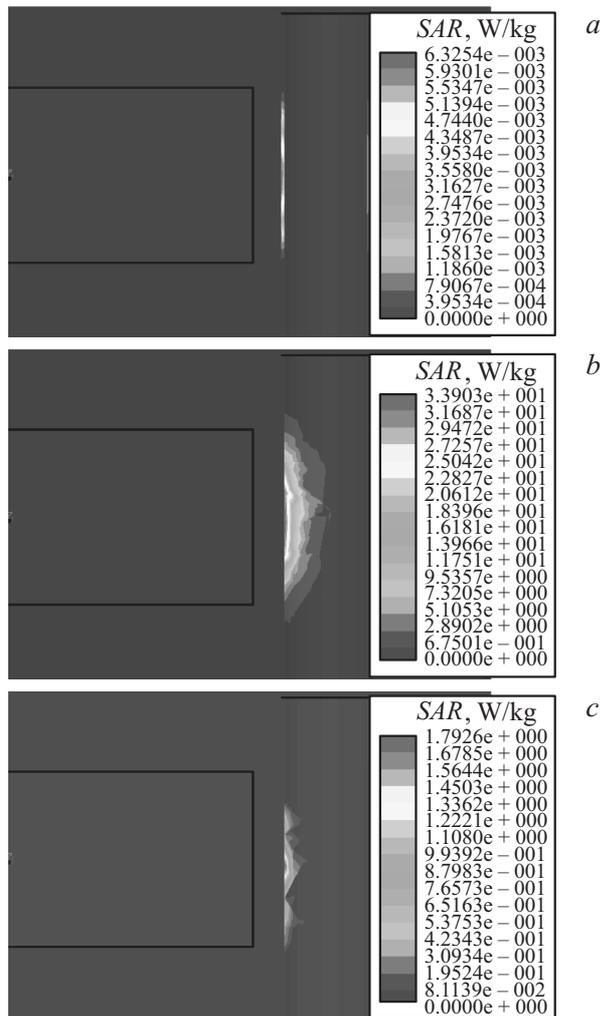
Объемная концентрация включений	Диэлектрическая проницаемость	Проводимость, $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
0	2.5000	$3 \cdot 10^{-10}$
0.05	2.7253	$3.52 \cdot 10^{-10}$
0.15	3.2185	$5.45 \cdot 10^{-10}$
0.3333	4.2863	$2.99 \cdot 10^{-6}$
0.3334	4.2869	2
0.33367	4.2886	10
0.334	4.2907	20
0.4	4.7260	2000

этом представляет собой излучатель и замкнутый объем с исследуемым веществом. Моделируемый эксперимент был максимально приближен к натурному эксперименту [9]. Предположим, что исследуемый образец находится в трубке из слабопоглощающего материала — фторопласта. Такая трубка может служить частью промышленной установки по облучению электромагнитным СВЧ-излучением. В качестве облучающей системы возьмем отрезок прямоугольного волновода, облучение будет проводиться его открытым концом (размеры волновода 43.18 на 86.36 mm). Внутренний диаметр трубки был выбран равным 40 mm, толщина стенок — 2 mm. Облучение проводилось на частоте 2.45 GHz. Модель трубки с исследуемым веществом располагалась в максимуме электрического поля, который был определен по промоделированному распределению в отсутствие трубки, на расстоянии 35 mm от открытого конца волновода.

В качестве вещества, заполняющего трубку, были взяты керосин без добавок и набор магнитных жидкостей на основе керосина с электрофизическими параметрами, рассчитанными относительно концентрации включений. С ростом концентрации напряженность поля внутри трубки уменьшается. На двумерном распределении поля в плоскости (рис. 1), пересекающей трубку с образцом и волновод по узкой стенке, видно, что при небольших концентрациях включений поле проходит через трубку, испытывая некоторое ослабление. При больших



**Рис. 1.** Распределение электрического поля  $E$  в плоскости, пересекающей трубку с образцом и волновод по узкой стенке: *a* — при концентрации включений 5%, *b* — при концентрации включений 33.34%.



**Рис. 2.** Распределение поглощенной удельной мощности  $SAR$  в зависимости от величины концентрации включений: *a* — при концентрации включений 5%, *b* — при концентрации включений 33.34%, *c* — при концентрации включений 33.4%.

концентрациях, близких к порогу протекания, поле испытывает эффект вытеснения. С ростом концентрации хорошо проводящих включений наблюдается увеличение поглощенной мощности. Это связано с тем, что происходит значительное увеличение проводимости образца с ростом концентрации включений. Одновременно с этим, при дальнейшем увеличении концентрации происходит обратный процесс, и величина поглощенной удельной мощности уменьшается. Это в свою очередь связано с тем, что напряженность электрического поля в образце уменьшается, так как поле испытывает вытеснение с ростом проводимости образца, нивелируя ее рост. На двумерном распределении удельной поглощенной мощности в плоскости (рис. 2), пересекающей волновод по узкой стенке и трубку с образцом, видно, что при малой концентрации включений поглощение идет в основном в стенках трубки, выполненных из слабопоглощающего материала. С ростом концентрации все большая мощность поглощается внутри объема трубки. При достижении порога протекания электрическое поле испытывает эффект вытеснения, проникая внутрь объема трубки на все меньшее расстояние, что наблюдается в сокращении области поглощения СВЧ-энергии.

Таким образом, в ходе работы проведено моделирование распределения электромагнитного поля сверхвысокой частоты, а также удельной поглощенной мощности излучения в образцах магнитных жидкостей с различным объемным содержанием наночастиц. Установлена концентрация наночастиц, при которой наблюдается качественное изменение свойств коллоидного раствора, созданного на их основе, продемонстрирован эффект отсутствия проникновения электромагнитного поля в образец при достижении критической концентрации наночастиц.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-03-31344 мол\_а).

## Список литературы

- [1] Губин С.П., Кокиаров Ю.А., Холутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [2] Hafeli U., Schutt W., Teller J., Zborowski M. Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers. N. Y.: Plenum, 1997. P. 628.

- [3] Акчурин Г.Г., Акчурин Г.Г., Горин Д.А., Портнов С.А. Патент 2382659 (РФ). Способ локального разрушения опухолей с помощью СВЧ нагрева магнитных наночастиц // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.: ФИПС, 2010. № 6. С. 1–4.
- [4] Kalinin Yu.A., Starodubov A.V., Moiseenko A.V. // 20th Int. Crimean Conf. „Microwave & Telecommunication Technology“ (CriMiCo’2010). Conference Proceedings. Sevastopol: Weber Publishing, 2010. P. 1093–1094.
- [5] Снарский А.А. // УФН. 2007. № 12. С. 1341–1344.
- [6] Милкин С.С., Стародубов А.В., Герман С.В., Маркин А.В., Горин Д.А., Вениг С.Б., Калинин Ю.А. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 22–26.
- [7] Fannin P.C., Marin C.N., Malaescu I., Stefu N. // J. Physics: Condensed Matter. 2007. V. 19. N 3. P. 036 104.
- [8] Hao T. Electrorheological Fluids. V. 22: The Non-aqueous Suspensions (Studies in Interface Science). Amsterdam; Boston: Elsevier, 2005. P. 578.
- [9] Милкин С.С., Стародубов А.В., Вениг С.Б. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 1. С. 121–126.