

УДК 51-74

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕФРАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОТОКА ЖИДКОСТИ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

К. М. Зейде

Уральский Федеральный Университет, Институт радиоэлектроники и информационных технологий, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.32

Статья поступила в редакцию 31 августа 2018 г.

Аннотация. В данной работе описывается применение метода дискретных элементов для решения конкретной электродинамической задачи, а именно, для изучения рефракционных свойств потока жидкости, который увлекает мелкодисперсные примеси, помещенные в него. Изучение проблемы состоит из ряда натуральных испытаний и постановки целевого вычислительного эксперимента над моделью, с использованием метода дискретных элементов, для получения данных для верификации последующего лабораторного исследования. Основной акцент в данной работе делается на обозначенном эксперименте, тогда как моделирование методом дискретных элементов, предлагается использовать, как возможный инструмент функционального цикла апробации теоретических выкладок. Исследование проводится на примере железного порошка с известными параметрами, помещенного в движущуюся жидкость. Рефракционные свойства изучаются волноводным методом.

Ключевые слова: метод дискретных элементов, динамическое моделирование, гранулы, поток жидкости, рефракционные свойства.

Abstract. In this paper, we describe the application of the discrete element method to solve a specific electrodynamic problem, namely, to study the refractive properties of the flow that drags the finely dispersed impurities placed in it. The study of the problem consists of a number of full-scale tests and setting up a target computational experiment on the model using the discrete element method to obtain data for

verification of a subsequent laboratory study. The main emphasis in this work is done on the indicated experiment, whereas modeling by the discrete element method is proposed to be used as a possible tool of the functional cycle of approbation of theoretical provisions. The study is carried out on the example of an iron powder with known parameters placed in a moving liquid. Refractive properties are studied by the waveguide method. A model of dynamic modeling, a connection of the method of discrete elements with the finite element method, and the setting up of physical simulation conditions are proposed.

Key words: discrete element method, dynamic modeling, particles, flow, electromagnetic refraction.

1. Введение

Создание радиотехнических комплексов с использованием материалов, дифракционными и рефракционными свойствами, которых, можно управлять в режиме реального времени, является актуальной задачей. Предложенная работа дает общее представление о классе материалов, свойствами которых можно управлять путем изменения концентрации примесей в замкнутом анализируемом объеме.

В работе [1] описывается постановка задачи по определению электрофизических параметров мелкодисперсного материала находящегося в движении, относительно наблюдателя. Целевые параметры материала были измерены в лабораторных условиях, но для покоящегося образца. Изменение дифракционных и рефракционных свойств того же материала, в случае, когда его гранулы определенным образом перемещаются в пространстве, находилось через полуаналитические выражения, оперирующие с простейшими функциями движения группы частиц. Допустимость такого подхода заключалась в том, что мелкодисперсный материал был зафиксирован в диэлектрической матрице и частицы фактически не взаимодействовали друг с другом в процессе перемещения. В случае отсутствия такой фиксации применимость полуаналитического подхода вызывает сомнения, из-за принципиальной

сложности в описании функции движения и взаимодействия частиц, которая имеет выраженный стохастический характер. В работе [2] описывается планирование эксперимента по изучению рефракционных свойств потока жидкости с мелкодисперсными примесями. Основной проблемой в постановке натурального исследования, является отсутствие данных моделирования, которые обеспечили бы необходимую верификацию результатов.

2. Постановка задачи

Рассмотрим измерительную систему, подобную [3], которая снимает данные об электрофизических параметрах водяного потока, в который помещен мелкодисперсный металлический порошок и является взвесью. Регулируя скорость потока, можно изменять концентрацию гранул порошка в изолированном объеме, который находится под наблюдением. Очевидным, также является тот факт, что концентрация гранул металлического порошка, напрямую влияет на дифракционные и рефракционные свойства материала. Это подтверждается экспериментами [1] и [4], а также многими другими. Для получения точной зависимости электрофизических параметров материала от концентрации гранул порошка в объеме, был проведен натуральный эксперимент. Схема изучения стандартная для волноводных методов измерения [3], [5]. Следует указать, что измерения проводились над неподвижным, несжатым, равномерно распределенном в объеме и не зафиксированном металлическом порошке. Контроль неуплотненного состояния материала проводился с использованием критериев из [6].

Для расположения образца в волноводе применялось прямоугольное металлическое «окно», полость для порошка, в котором, создавалась ограничением замкнутого объема, с помощью радиотехнического пенопласта с относительно диэлектрической проницаемостью равной единице.

Что бы обеспечить равномерное распределение порошка в полости держателя, линия фиксировалась в вертикальном положении. Такое положение, так же исключает скатывание гранул материала в одну из сторон. Фиксированное давление на образец со стороны верхней пенопластовой

пластины так же преследует эту цель, однако степень такого воздействия не вызывает уплотнения порошка. Фотография, иллюстрирующая собранную лабораторную установку представлена на рис.1.



Рис. 1. Экспериментальная установка.

Ниже приведены справочные данные для используемого в изучении материала:

- маркировка порошка: пжр 3.200.28,
- химический состав: углерод $\leq 0.05\%$, кремний $\leq 0.08\%$, марганец $\leq 0.20\%$, сера и фосфор $\leq 0.02\%$, кислород $\leq 0.50\%$,
- класс крупности: 200 мкм (выход фракции 65-70%, при размере частиц 0.045 – 0.16 мм),
- насыпная плотность: 2.7 – 2.9 г/см³,
- текучесть: 32 с/50г.

Для прослеживания влияния концентрации порошка, исследовалось три образца, с различной толщиной материала: $h = 0.51\text{мм}$, 1.50мм и 2.18мм (см рис. 2). Из этих значений нетрудно найти объем, занимаемый материалом в держателе (объем полости, ограниченной пенопластовыми пластинками, согласно рис. 2: $V = 1.17 \times 10^{-7} \text{ м}^3$, $3.45 \times 10^{-7} \text{ м}^3$ и $5.014 \times 10^{-7} \text{ м}^3$. Принимая условие, что гранулы порошка имеют сферическую форму со средним диаметром 0.0575 мм ($V_0 = 9.95 \times 10^{-14} \text{ м}^3$), а так же зная плотность железа ($\rho =$

7850 кг/м³), несложно найти среднюю массу одной гранулы порошка: $m_0 = 7.8 \times 10^{-10}$ кг. Теперь учитывая насыпную плотность железного порошка, вычисляем массу трех образцов: $m = 3.4 \times 10^{-4}$ кг, 1×10^{-3} кг, 1.45×10^{-3} кг. Среднее количество гранул порошка в каждом из образцов находим из соотношения массы образца к массе одной гранулы: $N = 436 \times 10^3$, 1282×10^3 , 1859×10^3 . Объем занимаемый воздухом в образце ищется, как $V_\phi = V - NV_0$. Имеем: $V_\phi = 7.4 \times 10^{-8}$ м³, 2.2×10^{-7} м³, 3.2×10^{-7} м³. Отношение V/V_ϕ , должно оставаться постоянным (≈ 1.6). Концентрация порошка в каждом из образцов так же остается неизменной, что свидетельствует о неуплотненном состоянии мелкодисперсного материала. Отношение объема порошка к общему объему образца – прямой аналог процентного содержания мелкодисперсного материала в фиксирующем диэлектрике [1]. Это значение так же одинаково для всех трех образцов ($\approx 37\%$). Фактически, это количественные параметры позволяют проследить связь выходных параметров эксперимента для «чистого» материала и для материала, равномерно распределенного в диэлектрике с близкими к воздуху электрофизическими параметрами.

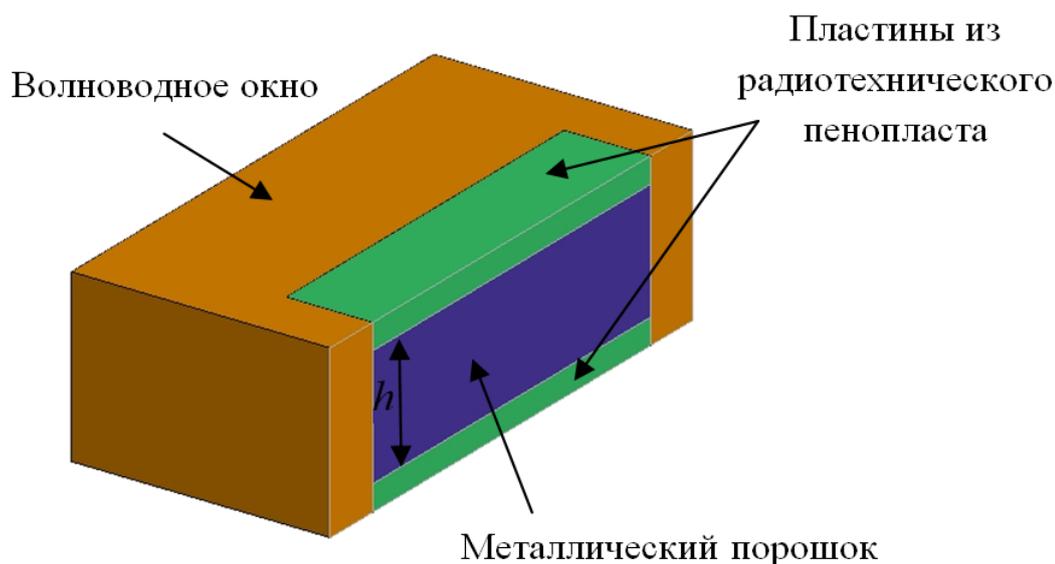


Рис. 2. Конструкция держателя образца и модель в САПР электромагнитного моделирования.

Судя по полученным данным изменение концентрации порошка, находящегося в неуплотненном состоянии обеспечивает контролируемое

изменение реальной части относительной диэлектрической проницаемости материала. Более того, в первом приближении можно утверждать, что зависимость $\langle \text{Re}(\varepsilon) \rangle(N)$, где $\langle \text{Re}(\varepsilon) \rangle$ – среднее значение реальной части диэлектрической проницаемости материала (условно для частоты $f = 10$ ГГц), имеет линейную зависимость. Аналитическое уравнение такой прямой может быть записано в следующем виде:

$$\langle \text{Re}(\varepsilon) \rangle(N) = 2.23 \times 10^{-6} N + 0.86, \quad (1)$$

Рис. 3 иллюстрирует эту формулировку. На нем, сплошная линия соединяет три точки, соответствующие проведенному эксперименту, а пунктирная показывает ход прямой (1).

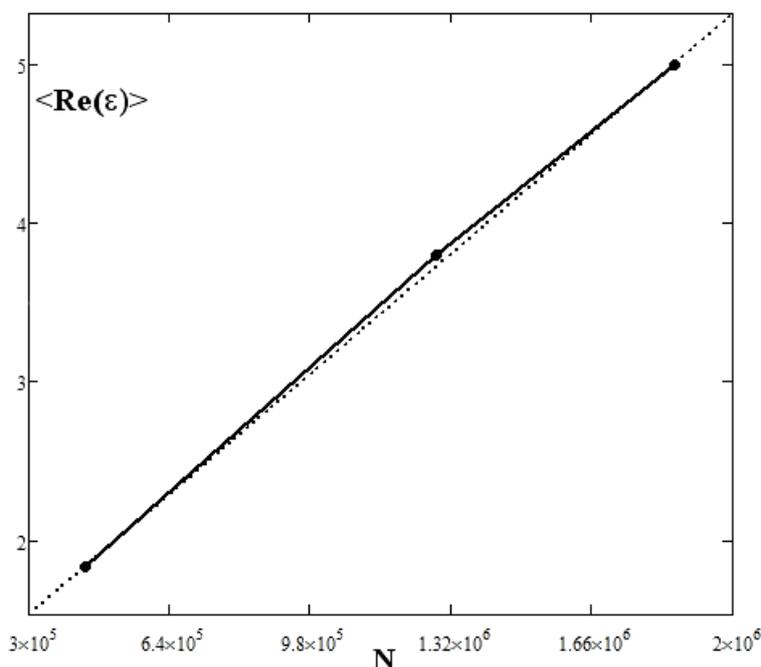


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от количества гранул в образце.

Убедившись в том, что концентрация гранул порошка в замкнутом объеме, напрямую влияет на диэлектрическую проницаемости материала, открытым вопросом остается способ автоматизированного управления этой величиной в реальном времени. Предлагаемые способы являются гипотетическими и требуют экспериментального обоснования. Общим для всех предполагаемых способов является условие помещения мелкодисперсного материала в жидкость, тем самым это указывает на необходимость измерения

электрофизических параметров жидких диэлектриков, причем находящихся в состоянии движения.

3. Моделирование

Железный порошок, добавленный в жидкость, является мелкодисперсной нерастворимой взвесью. Если физические параметры жидкости обеспечивают равномерное перемещение гранул порошка при ненулевой скорости ламинарного течения, то регулируя скорость потока, можно обеспечивать требуемое значение количества частиц взвеси, проходящей через определенный замкнутый объем. Такова общая предпосылка к исследованию в целом, и к применению метода дискретных элементов в этой задаче, в частности.

Как уже было указано во введении, перед постановкой натурального эксперимента, необходимо провести численное моделирование предложенной системы, с целью получения данных для верификации, а также для подтверждения ожиданий, основанных на выдвигаемой теории. В силу того, что в целевом эксперименте участвуют движущееся, за счет механических сил частицы, логично, для моделирования этого процесса применить метод дискретных элементов (МДЭ). Следует также указать, что описанная система не является сложной для моделирования МДЭ [7]. Мы используем программу MercuryDPM с открытым исходным кодом, что предоставляет практически неограниченные возможности в моделировании и анализе [8].

На рис. 4 изображена система, которая реализуется в программном комплексе МДЭ. Очевидно, что симуляция осуществляется во временной области, а моделирование является динамическим, следовательно, целевой характеристикой системы является $N_o(t)$, где величина N_o – наблюдаемая концентрация гранул в ограниченном объеме в данный момент времени. В самом общем случае каждая частица системы обладает постоянной скоростью V_p равной скорости потока жидкости. Динамические и физические особенности системы, такие как сила притяжения действующая на частицу, вязкость жидкости, температура жидкости, сопротивление движению частиц в потоке, характер потока и количество степеней свободы частицы, так или иначе, могут

быть учтены дополнительными условиями, включенными в систему. Вектор s , на рис. 4, показывает смещение частиц от горизонтальной траектории их перемещения. Физически этот вектор является результатом векторной суммы внешних воздействий на частицы, учитываемых в системе. Такими воздействиями могут являться: гравитация, конвекция, гидродинамические характеристики потока и т.д. Данная величина может быть получена с использованием теории возмущений [9]. Данный подход может быть также эффективно применен для кластеризации системы, с целью выделения замкнутого объема для последующего анализа. Тем не менее, в рассматриваемом случае в этом нет необходимости, потому как топология модели МДЭ полностью соответствует топологии модели в САПР электромагнитного моделирования, с той лишь разницей, что металлический порошок находится в состоянии движения (см. рис. 2).

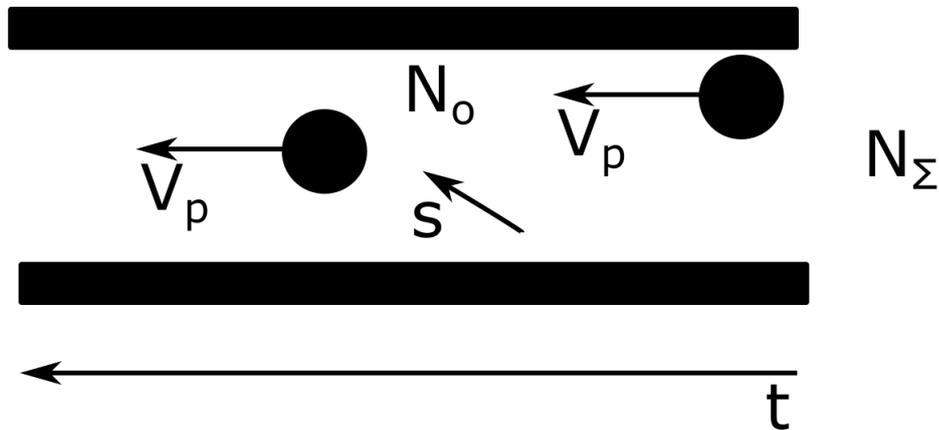


Рис. 4. Постановка задачи в методе дискретных элементов.

Следует указать, что моделируется сферическая форма частиц. Все физические и геометрические данные о гранулах представлены в предыдущем разделе и задаются в качестве исходных параметров анализируемой системы. На рис. 4, величина N_Σ есть суммарное количество частиц, фигурирующее в системе. Частицы, вышедшие из анализируемого объема, удаляются из памяти ЭВМ и больше не присутствуют в системе, как таковые. Такое моделирование очевидным образом ограничено по времени:

$$N_{\Sigma}(m) = N_{\Sigma}(0) - mN_o, \quad (2)$$

где $m = \frac{t}{\Delta t}$ – номер отчета о состоянии системы. Отчеты снимают через интервал времени равный Δt .

Ядро вычислителя МДЭ обрабатывает все возможные столкновения, такие как частица – стенка или частица – частица. Столкновения считаются упругими. Принципы вычислений в ядре используемого ПО изложены в [8] и [10]. В таблице 1 приведен необходимый набор входных данных для моделирования МДЭ предложенной системы.

Таблица 1 – входные данные моделирования МДЭ.

N_{Σ}	Vp	s	DOF	V_o, m_o	Δt
10^4	3 м/с	$m_o \vec{g}$	3	$9.95 \times 10^{-14} \text{ м}^3$, $7.8 \times 10^{-10} \text{ кг}$	0.01 с

Дадим необходимые пояснения для данных, приведенных в таблице 1. Во-первых, суммарное количество частиц в системе является главным фактором, влияющим на требуемые вычислительные ресурсы. В силу того, что в предыдущем разделе анализировались образы с количеством гранул порядка 3, общее количество элементов должно обеспечивать взятие как можно большего количества отчетов о системе с таким порядком количества гранул в анализируемом объеме. Скорость гранул величина изменяемая, в данном случае она соответствует достижимой в эксперименте [2] величине. Вектор смещения s задается только гравитационным воздействием на гранулы порошка (более точное описание, при необходимости, может быть получено, например в [11]). Значение DOF – количество степеней свободы, указывает на отсутствие сложной динамики частиц (вращение вокруг своей оси и т.д.). Значения объема и массы одной гранулы получены в предыдущем разделе. Промежуток времени между отчетами может быть изменен в зависимости от доступных вычислительных ресурсов.

4. Заключение

Обладая данными моделирования, основной результат которого выражается в виде временной зависимости $N_o(t)$, используя эмпирически полученное выражение (1), получить зависимость, как на рис. 3 в любой интересующий момент времени.

Важным свойством предлагаемого метода, является топологическая эквивалентность систем в САПР электромагнитного моделирования и ПО МДЭ. Такой подход позволяет проводить распределенные вычисления между различными комплексами, что в свою очередь полностью соответствует концепции мультифизического моделирования. В этом контексте был проведен дополнительный натурный эксперимент, по различимости металлической сферы (в эксперименте выступала, как Рэлеевская частица – гранула), помещенной в прямоугольный волновод [12]. Целью данного эксперимента являлась частотная зависимость коэффициента отражения в замкнутом пространстве. Обладая этими данными, не составляет труда провести численное моделирование, методом конечных элементов (МКЭ), по изучению частотной зависимости коэффициента отражения множества гранул по топологии, как на рис. 2. Параллельными процессами в независимых программных модулях МКЭ и МДЭ возможно реконструкция топологии в САПР электромагнитного моделирования, в соответствии с данными о количестве гранул в анализируемом объеме в текущий момент времени. Тем самым эмпирическая зависимость, показанная на рис. 3 получает свое численное подтверждение, как для статического, так и для динамического случаев.

Литература

1. Zeyde K.M. Analysis of electrodynamic properties of materials with high dispersity metal powder in axial moving systems. *Material Science Forum*. Vol. 870, 2016, pp. 90-94.

2. Зейде К.М., Шаров В.В. Экспериментальное исследование рефракционных свойств потока воды с мелкодисперсными примесями // Тезисы докладов V Международной молодежной научной конференции ФТИ, 2018, стр. 124-126.
3. Knyazev N.S., Malkin A.I. Dielectric permittivity and permeability measurement system. *CEUR-WS Proceedings*. Vol. 1814, 2017, pp. 45-51.
4. Zeyde K.M., Gudkova S.A., Vinnik D.A. Investigation of Barrium Hexaferrite BaFe₁₂O₁₉ Electro Physical Parameters Using Open-ended Coaxial Probe Method. *Solid State Phenomena*. Vol. 265, 2017, pp. 834-838.
5. Зейде К.М., Малкин А.И., Шаров В.В. Особые уточнения к волноводному методу измерения параметров материалов // Сборник докладов ИТТСУ, М.: Эдитус, 2017, стр. 107-115.
6. Nelson S.O. Density-permittivity relationships for powdered and granular materials. *IEEE Trans. on instrumentation and measurement*. Vol. 54, No. 5, 2005, pp. 2033-2040.
7. Yu Jian-qun, Fu Hong, Sun Yu-jing. Development and its application of a digital design software based on discrete element method. *Proceedings of 15th international conference on mechatronics and machine vision in practice*. 2008, pp. 216-220.
8. Mercury DPM code for discrete particle simulations [online resource]. Сайт Университета Твенте, Нидерланды. URL: www.mercurydpm.org
9. Зейде К.М., Пирожков Д.В. Реализация кластерного метода описания анизотропной среды в рамках теории возмущений // Сборник докладов ИТТСУ, М.: Эдитус, 2017, стр. 80-86.
10. Thornton A., Weinhart T., Luding S., Bokhove O. Modeling of particle size segregation: calibration using the discrete particle method. *International Journal of Modern Physics C*. Vol. 23, No. 8, 2012, pp. 1-12.
11. Клишин С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся

канале // Горный информационно-аналитический бюллетень, №12, 2009, стр. 273-277.

12. Zeyde K.M. MDR analysis technique for a metallic sphere in the rectangular waveguide. *CEUR-WS Proceedings*. Vol. 2035, 2017, pp. 41-45.

Для цитирования:

К. М. Зейде. Применение метода дискретных элементов для изучения рефракционных свойств потока жидкости с мелкодисперсными примесями. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.4