

КОМПЛЕКСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МАТРИЧНЫХ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ЗОН КОНТАКТА МЕЖДУ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

М. В. Царев, В. В. Мокрушин, Е. В. Забавин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Постановка задачи

Одними из важнейших свойств гетерогенных систем являются их проводящие свойства (теплопроводность, электропроводность, магнитная и диэлектрическая проницаемость), объединенные термином «обобщенная проводимость». Такое обобщение основывается на формальном совпадении дифференциальных уравнений, описывающих скалярные и векторные поля для стационарных потоков тепла, электрического тока, электрической и магнитной индукции [1]. Описание проводящих свойств было и остается актуальной задачей материаловедения гетерогенных систем.

Существенный вклад в развитие теории обобщенной проводимости гетерогенных систем внес В. И. Оделевский, предложивший подход к составлению модели проводимости двухфазных систем [1], впоследствии широко использованный большинством исследователей. Его подход заключается в представлении проводящей системы в виде матричной структуры, в которой одна из фаз является матричной, другая – включениями. В рамках данного подхода рассматривается элементарная проводящая ячейка системы и ее эквивалентная электрическая схема, по которой описывается проводимость Λ всей системы

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(1 + \frac{\beta_1}{(1 - \beta_1)/3 + \Lambda_0 / (\Lambda_1 - \Lambda_0)} \right), \quad (1)$$

где Λ_0 – проводимость матричной фазы; Λ_1 – проводимость включений; β_1 – объемная концентрация включений. Частным случаем практического использования уравнения (1) является расчет обобщенной проводимости порошковых материалов.

С учетом допущений, лежащих в основе вывода формулы (1), ее применимость ограничена расчетом проводимости систем, характеризующихся сплошностью матричной фазы и отсутствием контактов между включениями. На практике же довольно часто встречаются порошковые гетерогенные системы с разрывом матричной фазы и наличием контактов между включениями, из которых самыми распространенными являются многие порошковые металлы. Их принадлежность к таким системам обусловлена наличием на поверхности металлических частиц оксидной пленки, составляющей дополнительную фазу с незначительной концентрацией, но, зачастую, с проводящими свойствами, сильно отличаю-

щимися от свойств металлической основы частиц. При приложении внешних уплотняющих усилий, концентрирующихся на малых контактных площадках частиц (например, при прессовании [2]), поверхностные пленки в местах контакта могут разрушаться с образованием зон проводимости непосредственно между металлическими основами частиц, что приводит к резкому возрастанию проводимости системы. Очевидно, что и в предельно уплотненном (беспористом) состоянии в металлическом порошке оксидная (матричная) фаза будет иметь разрывы, а металлические основы частиц (включения) будут соприкасаться друг с другом. Другим примером систем такого типа могут являться, например, полимерные композиты с наночастицами металлов, концентрация которых в полимерной матрице превышает пороговые значения и обуславливает наличие токопроводящих каналов (перколяционных кластеров) [4].

Для описания проводимости такого рода систем необходимо получить формулы, при выводе которых учитывается возможность разрыва матричной фазы с образованием контактов между включениями. Вариант решения данной задачи предложен одним из соавторов представляемого доклада в работе [3]. В настоящем докладе приведено описание ключевых моментов вывода искомых расчетных выражений, а также их адаптация для описания проводимости гетерогенных систем при пропускании через них переменного тока.

Вывод уравнений для количественного описания проводимости матричных двухфазных систем в случае разрыва матричной фазы и наличия зон контакта между включениями

Для вывода формулы, учитывающей наличие контактов между частицами фазы включений, в работе [3] использовался тот же подход, который использовал Оделевский [1] при выводе формулы (1), – так называемый метод сеток. Двухфазную систему (такую как, например, металлический порошок в беспористом состоянии) можно рассматривать как систему с ориентированными кубическими включениями, размещенными в узлах простой кубической решетки [1]. Схема такой системы при наличии зон проводимости между включениями представлена на рис. 1.

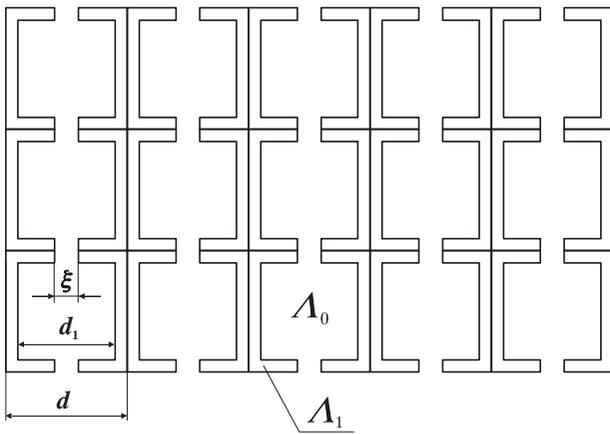


Рис. 1. Схема модели матричной гетерогенной системы с ориентированными кубическими включениями при наличии зон контакта между включениями

Введем следующие обозначения (см. рис. 1): d – размер элементарной ячейки рассматриваемой проводящей системы; d_1 – размер частицы фазы включений; ξ – эквивалентный диаметр суммарной контактной поверхности между соседними включениями, не экранированной матричной фазой.

Рассмотрение токовой задачи для описания проводимости матричных гетерогенных систем предполагает наличие однородного электрического поля, параллельного одной из главных осей кубической решетки [1]. Дробление элементарной ячейки проводящей системы может быть осуществлено плоскостями, параллельными эквипотенциальным поверхностям (перпендикулярно линиям тока), и наоборот, – плоскостями, перпендикулярными эквипотенциальным поверхностям (параллельно линиям тока). Первый случай в работе [5] назван изотермическим дроблением, второй – адиабатным. При этом в работе [5] постулировано, что для максимального приближения к истинным значениям проводимости необходимо использовать среднее арифметическое значение результатов расчета по моделям для адиабатного и изотермического дробления элементарной ячейки проводящей системы.

Схемы элементарных ячеек и их эквивалентные электрические схемы для изотермического и адиабатного дробления приведены на рис. 2. По аналогии с [1] обозначим через Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 проводимости геометрических компонентов элементарной ячейки, а через Y – проводимость ячейки в целом. Расчетные формулы для определения данных параметров, следующие из рис. 2, приведены в табл. 1.

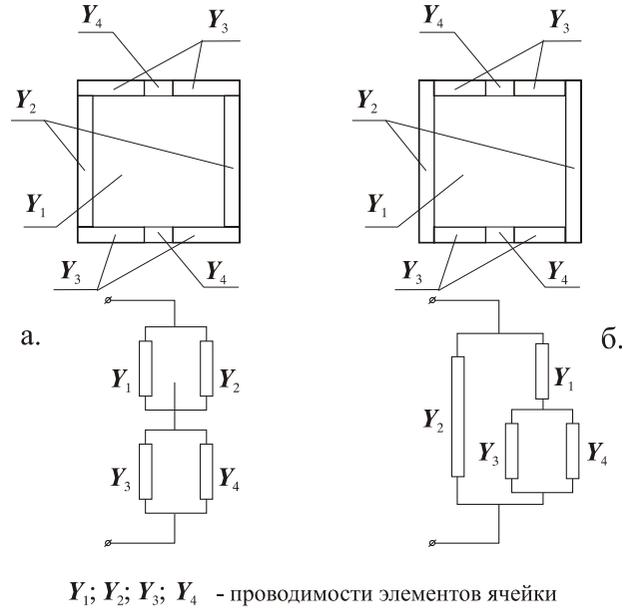


Рис. 2. Схемы элементарных ячеек и их эквивалентные электрические схемы для изотермического (а) и адиабатного (б) дробления

Подставляя в формулы для проводимости элементарной ячейки соответствующие выражения для проводимости ее компонентов (см. табл. 1), можно получить формулы для расчета обобщенной проводимости двухфазной матричной системы при изотермическом и адиабатном дроблении элементарной ячейки. При этом следует учесть, что для кубической ячейки средний размер частиц включений связан

Таблица 1

Выражения для проводимости элементарной ячейки в случае изотермического и адиабатного дробления

Дробление элементарной ячейки	Изотермическое дробление	Адиабатное дробление
Выражение для проводимости ячейки и каждого ее элемента	$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \Lambda_1 d_1; \\ Y_2 &= \Lambda_0 \frac{d^2 - d_1^2}{d_1}; \\ Y_3 &= \Lambda_0 \frac{d^2 - \xi^2}{d - d_1}; \\ Y_4 &= \Lambda_1 \frac{\xi^2}{d - d_1}; \\ Y &= \Lambda d. \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \Lambda_1 d_1; \\ Y_2 &= \Lambda_0 \frac{d^2 - d_1^2}{d}; \\ Y_3 &= \Lambda_0 \frac{d_1^2 - \xi^2}{d - d_1}; \\ Y_4 &= \Lambda_1 \frac{\xi^2}{d - d_1}; \\ Y &= \Lambda d. \end{aligned} \right\}$
Проводимость ячейки согласно эквивалентной электрической схеме	$Y = \frac{(Y_1 + Y_2)(Y_3 + Y_4)}{(Y_1 + Y_2) + (Y_3 + Y_4)}$	$Y = \frac{(Y_1 + Y_2)(Y_3 + Y_4) + Y_1(Y + Y_3)_1}{Y_3 + Y_4 + Y_1}$

с размером элементарной проводящей ячейки и объемной концентрацией включений β_1 соотношением

$$d_1 = \beta_1^{1/3} d. \quad (2)$$

Тогда, с учетом уравнения (2), окончательные выражения для проводимости в случае изотермического и адиабатического дроблений ячейки соответственно имеют вид

$$\Lambda = \frac{1}{\left(\frac{1 - \beta_1^{1/3}}{\Lambda_0 + (\Lambda_1 - \Lambda_0)\alpha_1} + \frac{\beta_1^{1/3}}{\Lambda_0 + (\Lambda_1 - \Lambda_0)\beta_1^{2/3}} \right)}, \quad (3)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(1 - \beta_1^{2/3} \right) + \frac{\Lambda_1 \beta_1^{1/3} \left(\Lambda_0 \beta_1^{2/3} + \alpha_1 (\Lambda_1 - \Lambda_0) \right)}{\Lambda_1 \beta_1^{1/3} + \beta_1^{2/3} (\Lambda_1 - \Lambda_0) + \alpha_1 (\Lambda_1 - \Lambda_0)}, \quad (4)$$

где $\alpha_1 = \frac{\xi^2}{d^2}$ – среднестатистическая относительная

площадь проекции неэкранированной матричной фазой проводящей поверхности между включениями, или относительное проводящее сечение фазы включений. В отличие от формулы Оделевского (1) наличие данного параметра позволяет учесть возможность нарушения целостности матричной фазы с образованием контактных зон между включениями.

Справедливость формул (3) и (4) можно показать, если проанализировать их для граничных условий. В том случае, когда система состоит из чистого материала фазы включений, то есть $\beta_1 = 1$, то $\Lambda = \Lambda_1$ как по формуле (3), так и по формуле (4). Если же система представляет собой только материал матричной фазы, то в обоих случаях $\beta_1 = 0$, $\Lambda = \Lambda_0$. В случаях, когда матричная фаза сохраняет свою целостность и полностью экранирует поверхность частиц фазы включений, т. е. $\alpha_1 = 0$, то выражения (3) и (4) соответственно преобразуются к более простым соотношениям

$$\Lambda = \Lambda_0 \frac{\Lambda_0 + (\Lambda_1 - \Lambda_0)\beta_1^{2/3}}{\Lambda_0 + (\Lambda_1 - \Lambda_0)\beta_1^{2/3} \left(1 - \beta_1^{1/3} \right)}; \quad (5)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(1 - \frac{(\Lambda_0 - \Lambda_1)\beta_1}{\Lambda_1 + (\Lambda_0 - \Lambda_1)\beta_1^{1/3}} \right). \quad (6)$$

Среднее арифметическое значение проводимости, получаемое по формулам (5) и (6) для различных примеров, практически совпадает с таковым, рассчитанным по формуле (1) (различия в результатах не превышают ~2%). Таким образом, соответствие формул (3) и (4) граничным условиям подтверждает возможность их использования для описания обобщенной проводимости двухфазных матричных гетерогенных систем в случае разрыва матричной фазы [3].

Практическое использование формул (3) и (4) для решения различных прикладных задач показало,

что полученные выражения адекватно описывают электропроводность порошковых материалов, структура которых в первом приближении может быть представлена в виде матричной двухфазной системы с наличием контактов между включениями (например, порошковых металлов с оксидной пленкой на поверхности частиц) [3].

Расчет комплексной проводимости матричных двухфазных систем в случае разрыва матричной фазы и наличия зон контакта между включениями

При рассмотрении комплексной проводимости гетерогенной матричной системы, являющейся характеристикой ее проводящих свойств в переменном электрическом токе, следует учитывать наличие двух составляющих проводимости: активной и реактивной (см., например, [6]). В этом случае комплексная проводимость каждого элемента системы и всей системы в целом будет состоять из двух слагаемых [7]

$$A = G + j\omega C, \quad (7)$$

где G – активная составляющая; $j\omega C$ – емкостная (реактивная) составляющая, представляющая собой произведение комплексной переменной j , круговой частоты переменного тока ω и емкости C соответственно [6]. Подстановка в формулу для расчета обобщенной проводимости гетерогенной системы уравнений (7), записанных для каждого из параметров Λ_0 , Λ_1 и Λ (в данном случае соответствующих комплексной проводимости матричной фазы, фазы включений и системы в целом), позволяет получить уравнения, описывающие комплексную проводимость системы в зависимости от проводящих характеристик и содержания образующих ее фаз. Такое преобразование формулы (1) было выполнено в работе [8] с целью получения уравнения, описывающего свойства поликристаллического твердого электролита. Примененный подход позволил теоретически оценить влияние концентрации основной и межзеренной фаз, а также вклад проводимости зерен электролита и межзеренных прослоек в величину комплексной проводимости материала. При этом применение полученной в работе [8] формулы для описания матричных систем, имеющих контакты между включениями, также не представляется возможным вследствие допущения об отсутствии возможности образования таких контактов, сделанном при выводе уравнения (1).

С целью получения выражений, позволяющих рассчитать комплексную проводимость систем с разрывами в матричной фазе, в соответствии с вышеуказанным подходом были преобразованы формулы (3) и (4), в результате чего проводимость фаз в данных уравнениях была записана через активную и реактивную составляющие.

Полученные формулы анализировались нами численным методом путем изучения зависимости

комплексного сопротивления (импеданса) системы от частоты протекаемого через нее переменного тока при заданных значениях остальных параметров, входящих в преобразованные уравнения (3) и (4). С целью выявления качественных отличий в характере протекания переменного тока в матричной гетерогенной системе в случае наличия и отсутствия контактов между включениями такой же анализ был проведен и для уравнения Оделевского (1), адаптированного для описания комплексной проводимости [8].

Задаваемые значения параметров исследуемых уравнений (объемная доля включений β_1 , активные составляющие проводимости матричной фазы G_0 и фазы включений G_1 , емкость межфазных границ C) соответствовали их значениям, заданным в работе [8]. Используемые в расчетах значения α_1 соответствовали значениям данного параметра, наиболее часто получаемым нами на практике при обработке результатов измерений электрического сопротивления уплотненных порошковых металлов, проводимых на постоянном токе. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 3.

Следует отметить, что расчет комплексного сопротивления системы для случая изотермического и адиабатного дробления элементарной ячейки приводит к получению практически одинаковых значений импеданса (отличающихся не более, чем на ~0,3 %) практически во всем диапазоне частот переменного тока. Вследствие этого, с учетом рекомендаций, данных в работе [5], частотные зависимости импеданса гетерогенных систем с наличием контактов между включениями, приведенные на рис. 3, соответствуют среднему арифметическому значению импеданса, взятому из результатов расчета по двум вариантам дробления элементарной ячейки.

Как видно из рис. 3, результаты численного моделирования свидетельствуют о наличии низко-

и высокочастотных пределов значений комплексного сопротивления гетерогенных матричных систем, положение которых зависит от объемного содержания β_1 и соотношения величин проводимостей G_1 и G_0 образующих систему фаз. Кроме того, в области «средних» частот наблюдается наличие плато, в пределах которого комплексное сопротивление системы не зависит от частоты протекаемого тока.

Сравнение результатов расчетов, проведенных по «модифицированной» формуле Оделевского [8], с результатами расчетов по преобразованным формулам (3) и (4) свидетельствует о том, что в области «средних» и «высоких» частот переменного тока комплексное сопротивление гетерогенных матричных систем одинаково вне зависимости от наличия или отсутствия контактов между включениями (см. рис. 3). Эти различия начинают проявляться при уменьшении частоты переменного тока и заключаются в закономерном уменьшении комплексного сопротивления системы при увеличении площадей контактов между включениями, незранированных прослойками матричной фазы. Степень увеличения площадей контактов характеризуется введенным в работе [3] параметром α_1 , значение которого изменяется от нуля до единицы. В предельных случаях, когда $\alpha_1 \rightarrow 0$ (контакты между включениями отсутствуют), левая часть частотной зависимости полностью совпадает с зависимостью, получаемой по формуле Оделевского для переменного тока. В случае же, когда $\alpha_1 \rightarrow 1$ (экранирование контактов между включениями матричной фазой отсутствует), левая часть частотной зависимости импеданса «опускается» вниз до уровня «среднечастотного» плато и далее от частоты не зависит. В этом случае низкочастотный предел сопротивления соответствует уровню сопротивления «плато».

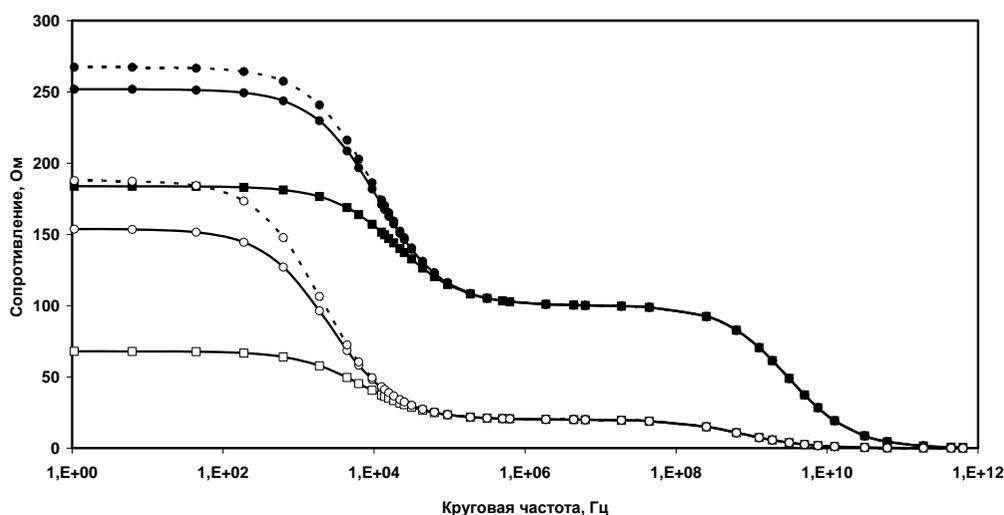


Рис. 3. Частотные зависимости импеданса гетерогенной матричной системы при наличии и отсутствии контактов между включениями: ● — $\beta_1 = 0,995$, $G_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-9}$ Ф, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-4}$; ■ — $\beta_1 = 0,995$, $G_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-9}$ Ф, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-3}$; ○ — $\beta_1 = 0,990$, $G_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-8}$ Ф, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-4}$; □ — $\beta_1 = 0,990$, $G_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-8}$ Ф, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-3}$; ● пунктир — $\beta_1 = 0,995$, $G_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-9}$ Ф (по Оделевскому); ○ пунктир — $\beta_1 = 0,990$, $G_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-8}$ Ф (по Оделевскому)

Общепринятое представление результатов, получаемых методом импедансной спектроскопии (см., например, [6]), заключается в построении так называемых годографов импеданса, представляющих собой зависимость мнимой части импеданса $-Z$ от ее действительной части Z . В нашем случае для проведения такого построения необходимо разделение вещественных и мнимых членов полученных нами уравнений с выражением активной и емкостной составляющих в явном виде, что представляет собой сложную математическую задачу. В рамках данной работы аналитического решения полученных нами уравнений не проводилось. С другой стороны, разделение вещественных и мнимых членов уравнения Оделевского, раскрытого для описания комплексной проводимости гетерогенных матричных систем, выполняется значительно проще. Такое разделение было выполнено в работе [8]. С учетом вышесказанного для наглядной иллюстрации полученных в докладе результатов мы приведем годографы импеданса, построенные нами по формулам из работы [8], с подстановкой в них тех же значений параметров β_1 , G_0 , G_1 и C , которые использовались в настоящем докладе при расчетах частотных зависимостей импеданса системы в случае отсутствия контактов между включениями (см. рис. 3). Расчетные годографы импеданса в этом случае имеют следующий вид (см. рис. 4).

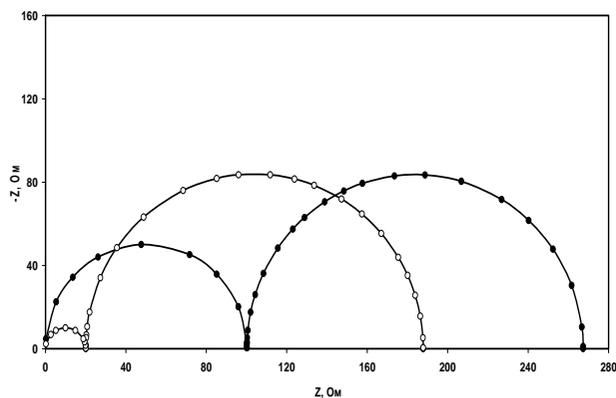


Рис. 4. Годографы импеданса гетерогенной матричной системы при отсутствии контактов между включениями:
 ● – $\beta_1 = 0,995$, $G_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-9}$ Ф;
 ○ – $\beta_1 = 0,990$, $G_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ см, $G_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ см, $C = 10^{-8}$ Ф

Из рис. 4 видно, что годограф импеданса матричной двухфазной системы при отсутствии зон контакта между включениями представляет собой две последовательно расположенные полуокружности, центры которых лежат на оси абсцисс. Правая часть годографов соответствует низким значениям частот переменного тока, левая часть – высоким. Начальной точкой годографа, соответствующей условию $\omega \rightarrow \infty$, является начало координат. Левая полуокружность отсекает на оси абсцисс отрезок $Z_1 = 1/G_1$, соответствующий величине активного сопротивления фазы включений, а правая полуокружность отсекает на этой же оси отрезок Z_2 , величина которого соответствует низкочастотному пределу комплексного со-

противления системы (см. рис. 3), связанного, в конечном счете, с величиной контактного сопротивления границы раздела двух фаз [6].

Согласно результатам представляемой нами работы внешний вид годографа импеданса гетерогенной матричной системы в случае наличия контактов между включениями также будет иметь вид двух последовательно расположенных полуокружностей, как и в случае отсутствия разрывов в матричной фазе. При этом при условии равенства задаваемых расчетных параметров левая полуокружность будет полностью совпадать с полуокружностью, построенной по модифицированной формуле Оделевского (см. рис. 4), а правая – будет иметь меньший радиус по сравнению с соответствующей полуокружностью, характеризующей систему с отсутствием контактов между включениями. Радиус этой полуокружности будет определяться значением параметра α_1 , отсутствующим в формуле Оделевского. Чем меньше будут экранированы матричной фазой контакты между включениями, т. е. чем больше будет значение α_1 , тем меньший радиус будет иметь правая полуокружность. В предельных случаях при $\alpha_1 \rightarrow 0$ она, так же как и левая, полностью совпадет с полуокружностью, построенной по модифицированной формуле (1), а в пределе при $\alpha_1 \rightarrow 1$ сожмется в точку с координатами $(R_1; 0)$.

Таким образом, в представляемом докладе впервые получены формулы, связывающие импеданс гетерогенной матричной системы с наличием зон контакта между включениями с частотой переменного тока, с импедансом и объемным содержанием образующих систему фаз, а также с параметром, характеризующим площадь контактов между включениями α_1 .

Интересно также рассмотреть комплексную проводимость матричной системы с использованием иного подхода, применяемого в методе импедансной спектроскопии, который заключается в выборе эквивалентной электрической схемы изучаемой системы с последующим моделированием ее импеданса в зависимости от значений параметров, входящих в выбранную схему. Несмотря на то, что количественное описание проводимости гетерогенной системы с помощью данного подхода затруднено вследствие его одномерности [8], а также отсутствия возможности учета содержания входящих в систему фаз, к его преимуществам следует отнести возможность оценки вклада характеристик отдельных элементов эквивалентной схемы в величину комплексной проводимости системы. При этом возможность привязки «виртуальных» элементов к элементам реальной системы очень важна для понимания сути процессов, происходящих при протекании переменного тока.

В качестве эквивалентных электрических схем, моделирующих проводимость матричной двухфазной системы, логично использовать эквивалентные схемы, представленные на рис. 2, с добавлением в них элементов, отвечающих за емкостное сопротивление (при условии отсутствия емкостной состав-

ляющей у фазы включений, обычно имеющей высокую проводимость). Полученные таким образом эквивалентные схемы для изотермического и адиабатного дробления элементарной ячейки (см. рис. 2), а также для модели с отсутствием контактов между включениями приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 схемы можно немного упростить. Во-первых, в реальных системах неидеальность контактов между включениями (остаточная пористость, примеси на поверхности частиц фазы включений и т. д.) обуславливает наличие между ними некоторого емкостного сопротивления, в приведенных выше схемах учитываемого емкостью $C3$. При этом в рамках рассматриваемой нами модели гетерогенной системы контакты между одной и той же фазой являются частью этой фазы и не имеют границы раздела. Это позволяет в зависимости от природы компонентов системы во многих случаях исключить из рассмотрения емкости $C3$ в приведенных выше схемах. Во-вторых, из эквивалентных схем, приведенных на рис. 2, следует необходимость разделения активного сопротивления контактов между включениями $R4$ (относящегося к фазе включений) и активного сопротивления прослоек матрич-

ной фазы между включениями, принимающего участие в переносе тока за счет туннельного эффекта $R3$ (относящегося к матричной фазе). При этом очевидно, что при высоком содержании матричной фазы $R3 \rightarrow R2$ (туннельный эффект отсутствует), а при высоком содержании включений $R3 \rightarrow R4$ (экранирующее влияние прослоек матричной фазы пропадает). На практике, пользуясь только анализом зависимости импеданса системы от частоты переменного тока, выделить вклад $R3$ и $R4$ в импеданс системы не представляется возможным. Для этого необходимо снятие вольт-амперных характеристик исследуемых контактов, что представляет собой отдельную научно-исследовательскую задачу. Вследствие вышесказанного, при рассмотрении комплексной проводимости гетерогенной системы методом импедансной спектроскопии активные сопротивления $R3$ и $R4$ целесообразно объединять в одно «эффективное» сопротивление контактов между включениями $R34$. Следует отметить, что в рамках рассматриваемого нами подхода именно параметр $R34$ является аналогом характеристики контактов между включениями, введенной в работе [3] как α_1 .

Таблица 2

Эквивалентные электрические схемы для моделирования импеданса гетерогенных матричных систем

Тип системы	Эквивалентная схема	Элементы схемы
Контакты между включениями отсутствуют		<p>$R1$ – Активное сопротивление включений $R2$ – Активное сопротивление матричной фазы $R3$ – Активное сопротивление прослоек матричной фазы между включениями, принимающих участие в переносе тока за счет туннельного эффекта $C1$ – Емкость между включениями $C2$ – Емкость межфазных контактов</p>
Имеются контакты между включениями (изотермическое дробление)		<p>$R1$ – Активное сопротивление включений $R2$ – Активное сопротивление матричной фазы $R3$ – Активное сопротивление прослоек матричной фазы между включениями, принимающих участие в переносе тока за счет туннельного эффекта $R4$ – Активное сопротивление контактов между включениями $C1$ – Емкость между включениями $C2$ – Емкость межфазных контактов $C3$ – Емкость контактов между включениями</p>
Имеются контакты между включениями (адиабатное дробление)		<p>$R1$ – Активное сопротивление включений $R2$ – Активное сопротивление матричной фазы $R3$ – Активное сопротивление прослоек матричной фазы между включениями, принимающих участие в переносе тока за счет туннельного эффекта $R4$ – Активное сопротивление контактов между включениями $C1$ – Емкость между включениями $C2$ – Емкость межфазных контактов $C3$ – Емкость контактов между включениями</p>

Моделирование годографов импеданса приведенных в табл. 2 эквивалентных схем (а также их упрощенных вариантов) с помощью программного пакета для обработки данных импедансной спектроскопии «ZView» показало, что эти годографы во всех случаях также представляют собой две полуокружности, соответствующие по форме приведенным на рис. 4. Данный факт свидетельствует о качественном совпадении результатов, полученных нами с применением двух принципиально различных теоретических подходов к описанию комплексной проводимости матричных гетерогенных систем. Количественное сравнение результатов в данном случае затруднено разным набором параметров, описывающих проводимость системы в рамках двух разных подходов. При этом практический интерес могут представлять качественные выводы, полученные нами при моделировании импеданса рассматриваемой системы с помощью пакета «ZView». Согласно результатам моделирования, указанная форма годографов импеданса сохраняется в случае, когда емкость межфазных контактов значительно превышает емкость между включениями, т. е. $C2 \gg C1$. Кроме того, расчеты показывают, что получить на практике (в мегагерцевом диапазоне) левую полуокружность годографа импеданса какой-либо реальной системы чрезвычайно сложно, поскольку для этого система должна обладать очень высокими значениями емкости $C1$, а фаза включений должна иметь достаточно высокое активное сопротивление $R1$.

Приведенные в докладе теоретические результаты частично подтверждены экспериментальными измерениями импеданса уплотненных образцов порошковых материалов различной природы в диапазоне частот переменного тока, доступном для измерения с помощью моста переменного тока P5083. Характер частотных зависимостей импеданса уплотненных порошковых металлов и смесей проводник-диэлектрик, получаемых с помощью данного прибора в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц, качественно согласуется с ходом кривых, представленных в настоящем докладе.

Полученные результаты имеют важное практическое значение при обработке данных резистометрических измерений различных порошковых материалов на постоянном токе, активно используемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ для решения разного рода прикладных задач. Также материалы доклада важны с точки зрения интерпретации получаемых экспериментальных данных и разработки научных основ измерений импеданса порошковых материалов на переменном токе, также развиваемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ в последние годы.

Выводы

1. Выведены формулы, связывающие обобщенную проводимость матричных двухфазных систем в случае наличия зон контакта между включениями, с проводимостью и содержанием образующих систему фаз. Новые формулы адекватно описывают,

например, проводимость металлических порошков, оксидные пленки которых разрушаются в местах контакта частиц при их уплотнении.

2. Полученные формулы адаптированы для описания комплексной проводимости матричных двухфазных систем, включающей в себя активную и емкостную составляющие. Показано, что годограф импеданса таких систем представляет собой две последовательно расположенные полуокружности, радиус которых зависит от содержания и соотношения величин проводимостей входящих в систему фаз. В случае наличия контактов между включениями радиус правой полуокружности также зависит от степени экранирования контактов между включениями прослойками матричной фазы.

3. Путем независимого подхода к теоретическому описанию импеданса гетерогенной матричной системы методом моделирования импеданса эквивалентной электрической схемы ее элементарной ячейки качественно подтверждены выводы о форме годографов рассматриваемой системы, полученные в рамках анализа формул обобщенной проводимости.

4. Предложены и обобщены эквивалентные электрические схемы для описания экспериментальных данных по измерению импеданса различных материалов, структура которых может быть представлена в виде гетерогенной матричной двухфазной системы.

Авторы выражают благодарность С. А. Пиманину, В. Н. Лашкову и П. Г. Бережко за поддержку и интерес к данной работе, а также А. А. Потанину, И. В. Дудорову и К. В. Коршунову за ценные замечания, сделанные при обсуждении полученных результатов.

Литература

1. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал технической физики. 1951. Т. 21. Вып. 6. С. 667–685.
2. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1969.
3. Мокрушин В. В. Модель обобщенной проводимости гетерогенных систем: Препринт ВНИИЭФ. 52-96, Саров: ВНИИЭФ, 1996.
4. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000.
5. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. П.: Энергия, 1974.
6. Иванов-Шиц А. К., Муринов И. В. Ионика твердого тела. В 2-х томах. Том 1. Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2000.
7. Укше А. Е., Укше Е. А. Комплексная проводимость гетерогенных систем металл-электролит // Электрохимия. 1981. Т. 17. Вып. 5. С. 649–654.
8. Укше А. Е., Укше Е. А. Импеданс поликристаллического твердого электролита // Электрохимия. 1981. Т. 17. Вып. 5. С. 776–780.