

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

д.т.н. Сынков В.Г., асп. Транковский Д.В. (ИФГП НАН Украины)

Предложена математическая модель проводимости материала для спецодежды шахтеров, с помощью которой проведено обобщение задачи узлов теории перколяции путем учета дальнего действия. Показано, что с увеличением параметра дальнего действия изменяется поведение функции проводимости вблизи порога протекания.

THE MODEL OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF WOVEN MATERIAL WITH METAL FIBERS

Synkov V.G., Trankovsky D.V.

The model of electrical conductivity of woven material with metal microfibers is proposed, which generalizes a problem of percolation theory units by the account of long-rang action. It is shown that with growth of non-locality the character of conductivity function behavior changes near percolation limit.

Повышение уровня защиты шахтеров от механических повреждений, загрязнений и электромагнитных полей выдвигает качественно новые требования к материалам, используемым в спецодежде. Особую роль в этих требованиях играют факторы долговечности, комфортности и минимизации электризуемости спецодежды при носке в подземных условиях [1,2].

Одно из основных значений в факторе комфортности имеет малый вес комплекта, определяемый поверхностной плотностью ткани, что входит в противоречие с механической прочностью, износостойкостью и электризуемостью материала. Высокие прочностные свойства ткани обеспечиваются введением в их структуру полимерных волокон и нитей, но с другой стороны, это повышает их электризуемость. Степень электризации текстильных материалов, т.е. их способность накапливать и сохранять на своей поверхности электрические заряды, зависит от электрической проводимости ткани и способности компонентов ее структуры либо обеспечивать перетекание зарядов от участков с высоким потенциалом к менее напря-

женным зонам, либо осуществлять релаксацию зарядов путем появления токов короны между отдельными участками или между тканью, окружающей средой и заземленным оборудованием. Вполне понятно, что определенную роль в облегчении или торможении этих процессов играют характеристики окружающей среды (влажность, запыленность, склонность к образованию заряженных аэрозолей, турбулентность воздушных потоков и др.) [3-6].

Наиболее важное положительное влияние на релаксацию зарядов оказывает модификация текстильного материала специальными добавками, вводимыми в структуру волокон, нитей или тканей на различных этапах их производства. В качестве таких модификаторов используются твердые проводящие частицы – наполнители химических волокон, электропроводящие покрытия на волокнах, нитях и тканях, металлические проволоочные элементы, добавляемые в штапельную пряжу или используемые как мононить при производстве ткани [4]. Введение в штапельную нить металлических микроволокон позволяет более полно использовать оба механизма релаксации зарядов (электронный и ионный), т.к. протяженные отрезки проводников при относительно малой массовой доле ввода в ткань (до 3%) обеспечивают не только разветвленную проводящую цепь, но и создают сетку концентраторов электрического поля, образуемых концами элементарных волокон и огранкой их поверхности [5].

Релаксация заряда в оговоренном случае определяется двумя механизмами: электронной проводимостью металлических волокон и ионной проводимостью промежутков между ними, стимулируемой концентрацией электрического поля концами и участками поверхности волокон большой кривизны. Соотношением вклада этих механизмов определяется проводимость отдельных участков ткани.

Компьютерная модель проводимости строится исходя из того, что ткань получена из полимерных (непроводящих) и металлизированных нитей. Металлические микроволокна диаметром 5–10 мкм и длиной 35–40 мм в количестве 30–75% веса смешиваются с полимерными волокнами и по кардной системе прядения формируется металлизированная нить диаметром порядка 250 мкм. В структуре полученной нити металлические волокна распределены случайным образом. Исследования показывают, что полученные нити обеспечивают проводимость лишь на участках длиной до 40 мм. Собранное же из этих нитей полотно надежно проводит ток на участках гораздо большей длины (приблизительно 200 мм). По-видимому, про-

водимость тканого полотна обеспечивается связными кластерами, образованными проводящими участками пересекающихся нитей.

Задача исследования проводимости таких кластеров отличается от задачи узлов теории перколяции своей нелокальностью – возможностью прямой связи между не соседними узлами. Представим проводящую часть тканого материала в виде квадратной решетки, образованной пересекающимися штапельными нитями, составленными из проводящих (металлических) и непроводящих (полимерных) волокон. Введем в модель характеристики электропроводности нитей и узлов решетки. Электрическая проводимость нити обусловлена наличием в ней некоторой доли проводящих металлических волокон. Величина проводимости является случайной функцией длины нити, определяемой целым рядом факторов: объемной долей металла, диаметром, длиной, проводимостью металлических включений; технологией получения нити; степенью ее натяжения [7]. Для нашей модели указанная функция должна быть задана. Вид функции принципиального значения не имеет. Чтобы проиллюстрировать особенности модели, мы принимаем зависимость проводимости нити $Y(l)$ от длины в следующем виде:

$$Y(l) = \begin{cases} k/l, & (1 < l < l_0); \\ 0, & (l > l_0), \end{cases} \quad (1)$$

Где l – длина нити, измеренная в d (d – параметр решетки); k – проводимость участка нити длиной d . Предельная длина l_0 моделирует тот факт, что вероятность образования электрически связной многозвенной цепочки из дискретных металлических волокон очень мала при большом числе ее звеньев. В нашей модели вероятность контакта задается параметром P .

При сделанных предположениях проводимость G_l решетки конечных размеров ($l \times l$) является случайной величиной, характеристики которой зависят от $Y(l)$, P и l . Предел $\langle G_l \rangle$ (угловыми скобками обозначено среднее значение) при $l \rightarrow \infty$ естественно связать с электрической проводимостью представленного элемента тканого материала.

Конкретная реализация случайной сетки сопротивлений, на основе которой определяется величина G_l , формируется следующим образом. Вначале просматриваются все узлы решетки $l \times l$ и с вероятностью P помечаются проводящие узлы, в которых произошло элек-

трическое соединение пересекающихся нитей. После этого каждый проводящий узел анализируется на предмет связи его с ближайшими проводящими соседями слева, справа, сверху и снизу. Проводящие узлы связываются электрическими сопротивлениями в случае, если расстояние между ними не превышает l_0 . Проводимость сопротивлений определяется по соотношениям (1). Проводящие узлы, связанные менее чем с двумя соседями исключаются из рассмотрения, т.к. очевидно, не могут входить в цепь сопротивлений.

Заметим, что приведенная выше задача формирования сети сопротивлений, в частном случае $l_0 = 1$, сводится к задаче узлов теории перколяции [8]. При $l_0 > 1$ получается обобщение задачи узлов, состоящее в учете дальнего действия. Проводимость G_l случайной сети сопротивлений вычисляется путем расчета методом узловых потенциалов [9].

С целью проведения вычислительных экспериментов и обработки их результатов нами разработана программа PERCAL для ПЭВМ, основанная на описанной выше модели и позволяющая формировать сетки сопротивлений, определять величину их проводимостей, рассчитывать среднее значение и дисперсию этой величины. Исходными данными для работы программы являются: зависимость $Y(l)$ (в простейшем случае, она принимается в виде (1)); параметры P , l ; количество испытаний для фиксированного набора параметров - N . Программа хранит матрицу узлов в виде двумерного массива указателей (pointer). Процедура Init просматривает все ячейки матрицы и с вероятностью P создает запись, описывающую этот узел. На эту запись и ссылается указатель, находящийся в рассматриваемой ячейке матрицы; иначе этот указатель равен NIL (в этой ячейке нет контакта, т.е. нет узла).

Эта запись содержит в себе следующие поля: кластерная метка, порядковый номер узла в кластере, значение потенциала в узле и ссылки на соседние узлы слева, справа, сверху и снизу (имеются в виду те из них, в которых есть соединение и расстояния между ними и рассматриваемым узлом не превышает l_0). Затем программа отображает на экране ПЭВМ сформированные сетки сопротивлений. После того, как процедура Init завершит свою работу, начинается выполняться процедура DelLink, удаляющая узлы, в которых ток не течет. Такими будут, в частности, узлы не имеющие хотя бы двух соседей (только если рассматриваемый узел не находится на 1-й и N -ной строках матрицы узлов).

Физика угля и горных пород

Когда все узлы связаны и лишние удалены, процедура составляет множество S_1 кластерных меток, которые присутствуют в узлах, находящихся в 1-й строке матрицы узлов, и множество S_2 , кластерных меток, присутствующих в узлах, находящихся в N -ной строке матрицы узлов. Затем создается множество S , в котором находятся метки, содержащиеся в S_1 и S_2 одновременно (пересечение множеств S_1 и S_2). Множество S содержит метки "бесконечных кластеров" (очевидно, что если кластер "бесконечный", то он начинается в 1-й и заканчивается в N -ной строках матрицы узлов, т.е. он проходит через всю перколяционную решетку). Если S пусто - таких кластеров нет. Затем, процедура сканирует всю матрицу узлов и удаляет те узлы, кластерная метка которых не содержится во множестве S . Теперь матрица узлов содержит только те узлы, которые входят в "бесконечный кластер" или пуста (в случае отсутствия "бесконечного кластера"), после чего на экране ПЭВМ выделяются цветом сопротивления, входящие в "бесконечный кластер", т.е. кластер, осуществляющий электрическую проводимость всей решетки (последнее, естественно, лишь в том случае, когда такой кластер существует).

В заключении, программа осуществляет расчет потенциалов в узлах и проводимости всей цепи узлов. На рис. 1 показаны два варианта сетки сопротивлений, полученные, соответственно при $l = 10$, $l_0 = 1$, $P = 0.4$ и $l = 10$, $l_0 = 3$, $P = 0.4$. Видно, что во втором случае имеется "бесконечный кластер". Числа возле узлов на рис. 1,б соответствуют номеру узла.

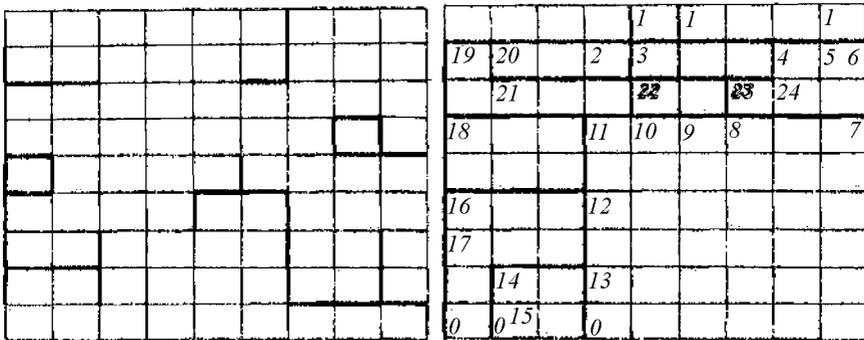


Рис. 1. Случайная сеть сопротивлений при: а - $l = 10$, $l_0 = 1$, $P = 0.4$; б - $l = 10$, $l_0 = 3$, $P = 0.4$

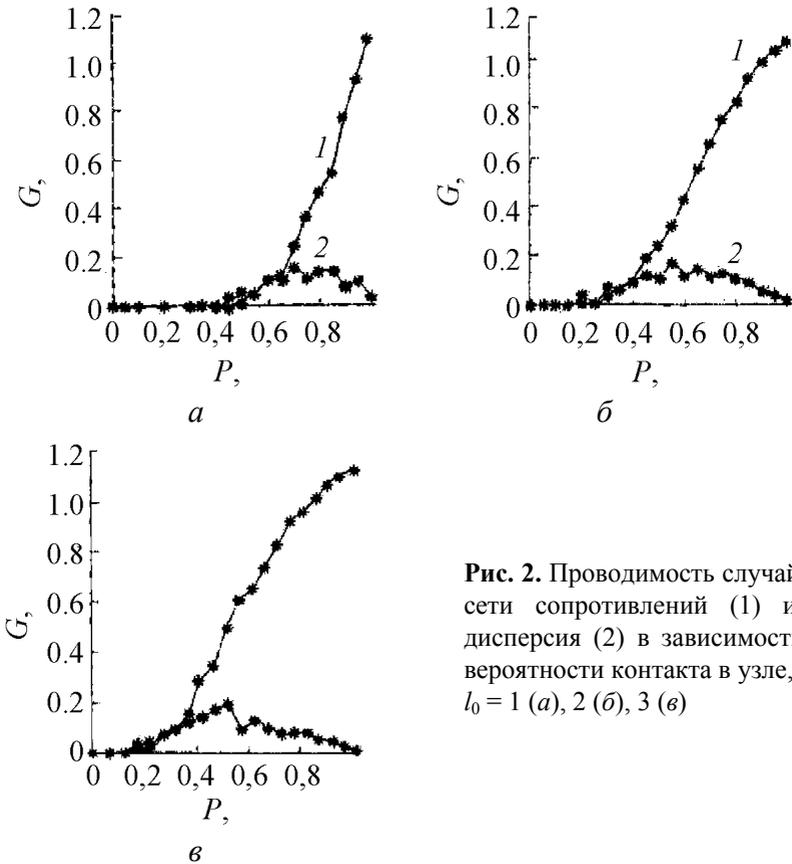


Рис. 2. Проводимость случайной сети сопротивлений (1) и ее дисперсия (2) в зависимости от вероятности контакта в узле, при $l_0 = 1$ (а), 2 (б), 3 (в)

На рис. 2 показаны рассчитанные с помощью программы *Percal* зависимости среднего значения и дисперсии $G_{20}(P)$ при различных l_0 . Видно, что во всех случаях имеется порог перколяции, который тем ниже, чем больше величина l_0 . В частном случае $l_0 = 1$ значение порога перколяции практически совпадают с данными расчетов [8].

Обращает на себя внимание характер зависимости $G_l(P)$ вблизи порога перколяции P_c . Согласно теории протекания [8], в окрестности P_c , при $P > P_c$, $G_l(P) = (P - P_c)^t$, где $t = 1.3$. Следовательно, вблизи P_c кривая $G_l(P)$ выпукла вниз (рис. 2а). С ростом дальнего действия l_0 характер поведения $G_l(P)$ вблизи порога протекания изменяется в направлении уменьшения второй производной, т.е. снижения показателя t . Уже при $l_0 = 3$, $t < 1$, и кривая зависимости $G_l(P)$ выпукла вверх.

Таким образом, разработанная модель и программа представляют интерес с позиции теории перколяции, учитывающей наличие дальних связей между элементами. В последующих сообщениях мы предполагаем показать влияние параметра дальнего действия l_0 на показатели теории перколяции и исследовать адекватность разработанной модели путем сопоставления численных и экспериментальных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швердяев О.Н. Антистатические полимерные материалы. М.: Химия, 1983.– 176 с.
2. Сынков В.Г., Транковская Л.Д., Дорошев В.Д. Пути реализации современных требований к износостойкости и взрывобезопасной спецодежде шахтеров. // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк, 2003. Сборник научных трудов, №6, с. 138–145
3. Гефтер П.Л. Электростатические явления в процессах переработки химических волокон.– М.: Легпромиздат, 1989.– 270 с.
4. Никитин А.А., Литош О.В., Благодаров Ю.А. и др. Механизм проводимости электропроводящих химических волокон и их электрофизические свойства. Обзор информации. Сер. «Промышленность химических волокон».– М.: НИИТЭХИМ, 1987.– 69 с.
5. Металлическое волокно «Бекинокс» как решение проблемы получения текстильных изделий с электропроводящими и антистатическими свойствами в целях безопасности// Лефевр И., Тиммерман Г.-Вевегем, Бельгия, Бельгийский НТЦ текстильной промышленности «Сентексбел», 1988,– 36с.
6. Саранчук В.И., Качан В.Н. Об электростатической взрывоопасности пылевых и водных аэрозолей в угольных шахтах // Уголь Украины, №8, 1983.– с. 43–45.
7. Левит Р.М. Электропроводящие химические волокна. М.: Химия, 1986.
8. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. - М.: Наука, 1979,– 416 с.
9. Нереттер В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ. М.: Энергоиздат, 1991.– 224 с.