

У. М. КАБЫЛБЕКОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЛЕГКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

(Представлена академиком НАН РК Т. Ш. Кальменовым)

Одним из направлений современного инструментального метода исследований физико-химических свойств является диэлектрический метод, который позволяет решать целый ряд задач, в том числе определение содержания влаги в материале и др. [1]. Применение во многих отраслях показало, что диэлектрические характеристики обладают высокой информативностью о физико-механических свойствах различных капиллярно пористых тел [2], одним из которых являются бетонные изделия на легких заполнителях. Например, бетонная смесь, содержащая значительное количество свободной влаги в начальный период твердения, имеет активную проводимость с небольшим значением индуктивности. Это объясняется тем, что каналы, заполнены водой с минимальными примесями, являются проводником, в результате чего образуется сеть проводников в полуизолирующей среде. Такая структура обладает в основном активной проводимостью, за счет каналов, образующих сквозную структуру с некоторой индуктивностью за счет наводимых в объеме образца магнитных полей. По мере химического связывания воды, каналы (поры) разделяются диэлектрическими пробками кристалла - гидратов и воздуха и после связывания большей части влаги структура бетона представляет собой диэлектрик с распределенными внутри проводниками – зернами, остатками влаги в проводящих порах (полуизолирующая среда). Такой способностью обладают полярные и ионные диэлектрики. Полярные диэлектрики имеют кристаллическую структуру частиц аморфного вещества (ZnS, AsGa, InAs) и

некоторых закрытых пор, заполненных газом аналогичную решетке алмаза, которые встречаются составе кварцевых песков, являющимися мелкими заполнителями цементных растворов, а ионные диэлектрики представляют собой водо-алюмосиликаты (Al_2O , SiO_2 , K_2O , H_2O), составляющие основу окислов цементного клинкера и являются неполярными диэлектриками [2, 3].

Известно, что диэлектрические материалы обладают незначительной электропроводностью. Основным электрическим свойством диэлектриков является их способность к поляризации. Под поляризацией понимают процесс упорядочения его связанных электрических зарядов под действием электрического поля. О способности диэлектрика поляризоваться судят по увеличению емкости конденсатора при помещении между его обкладками этого диэлектрика [4]. Если между обкладками конденсатора помещен *неполярный диэлектрик* (высокочастотный диэлектрик) мусковит с ярко выраженной плотной слоистой структурой, то пропорционально изменению напряженности электрического поля изменяются электрические моменты диполей и, соответственно, электрические заряды, наводимые на обкладках конденсатора, вследствие чего в диэлектрике возникает ток смещения (емкостный ток), пропорциональный скорости изменения напряженности поля: ξ

$$I_{\text{см}} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{d\xi}{dt}, \quad (1)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,84 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$); ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

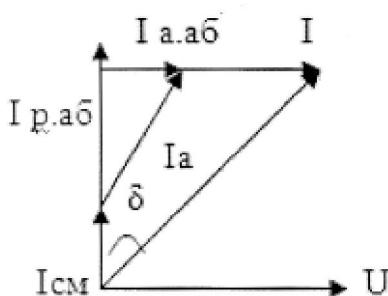


Рис. 1. Векторная диаграмма

Если напряженность поля изменяется по синусоидальному закону, то

$$I_{cm} = U\varpi C. \quad (2)$$

При этом I_{cm} опережает приложенное напряжение на угол $\pi/2$ (рис. 1).

Если между обкладками конденсатора помещен полярный диэлектрик, имеющий кристаллическую структуру частиц аморфного вещества (ZnS, AsGa, InAs), определяющую количество песка в цементном растворе и некоторых закрытых пор, заполненных газом аналогичную решетке алмаза, то поворот неупругих диполей запаздывает относительно изменения напряжения на величину временной релаксации $t_0 = 10^{-8}$ с, в результате чего возникающий ток опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Этот ток называется *током абсорбции*. Таким образом, ток смещения при этом I_{cm} обусловлен электронной поляризацией, а ток абсорбции I_{ab} – дипольной. Кроме того, в диэлектрике существует сквозной ток I_{ck} , характеризующий движение ионов при увеличении температуры и совпадающий по фазе с приложенным напряжением. Следовательно, полный ток равен $I = I_{ab} + I_{cm} + I_{ck}$. Активная составляющая тока равна $I_a = I_{ck} + I_{ab}$, реактивная $J_p = J_{cm} + J_{p,ab}$. Угол δ , дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением, называют углом *диэлектрических потерь*. Тангенс угла диэлектрических потерь, как это следует из векторной

диаграммы (рис. 1), можно рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_p}. \quad J_p = J_{cm} + J_{p,ab}. \quad (3)$$

Из-за наличия тока I_a в диэлектрике выделяется мощность

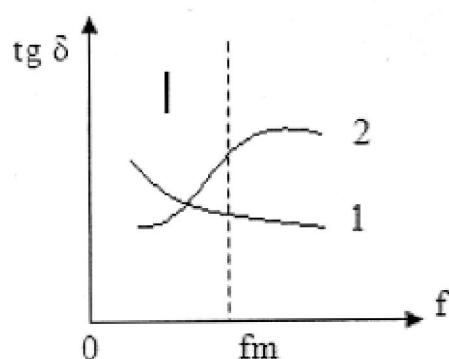
$$P_a = UI_a = UI_p \operatorname{tg}\delta.$$

Поскольку $P = U\varpi C$, то

$$P_a = U^2 \varpi C \operatorname{tg}\delta. \quad (4)$$

Таким образом, потери энергии в диэлектрике определяются величиной $\operatorname{tg}\delta$. У широко применяемых диэлектриков $\operatorname{tg}\delta = (2-5) \cdot 10^{-3}$, у высококачественных диэлектриков $\operatorname{tg}\delta = (2-5) \cdot 10^{-4}$. Следует заметить, что угол δ в векторной диаграмме (рис. 1), характеризует фазовые сдвиги между током и напряжения в зависимости от вида поляризации при фиксированных частотах внешнего приложенного напряжения, соответственно диэлектрическими потерями называют мощность, расходуемую электрическим полем на поляризацию диэлектрика. Поглощение мощности диэлектриком обусловлено медленными поляризациями и электропроводностью диэлектрика.

Согласно данным [4], в неполярных диэлектриках с увеличением частоты возрастает ток I_p , а ток I_a сохраняется неизменным, поэтому $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается (рис. 2, кривая 1).

Рис. 2. Частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta$

В полярных диэлектриках в области низких частот ток I_{ab} не велик, поэтому при повышении частоты $\text{tg}\delta$ уменьшается за счет роста тока I_{cm} . Затем с ростом частоты возрастает число переориентаций полярных молекул в единицу времени и увеличивается ток I_{ab} , вследствие чего растет $\text{tg}\delta$. На частоте f_m время установления дипольной поляризации становится равным длительности периода изменения напряженности поля и $\text{tg}\delta$ достигает максимума. При дальнейшем повышении частоты не хватает времени для переориентации полярных молекул, поэтому увеличивается ток $I_{a,ab}$ что ведет к уменьшению $\text{tg}\delta$. Таким образом, следует заметить, что более существенные параметры проявляются на высоких частотах. Исследование процесса структурообразования бетона на высоких частотах позволило создать электрическую модель указанного процесса [3]. Высокочастот-

ном диапазоне исследуемый материал может быть представлен в виде некоторой цепи с со средоточенными параметрами активного (R) и реактивных (L и C) элементов, значения которых меняются с изменением влажности [3]. Уменьшение содержания свободной влаги обуславливает появление и рост емкостной составляющей соответствующими токами смещения. После связывания большей части влаги структура бетона представляет собой диэлектрик с распределенными внутри проводниками-зернами, с остатками влаги в проводящих порах и с преобладанием реактивно-емкостной проводимости.

Рассмотрим процессы, происходящие в электрической цепи с последовательным соединением активного R и реактивных сопротивлений L и C синусоидальным переменным входным напряжением $U = U_m \sin\omega t$ (рис. 3).

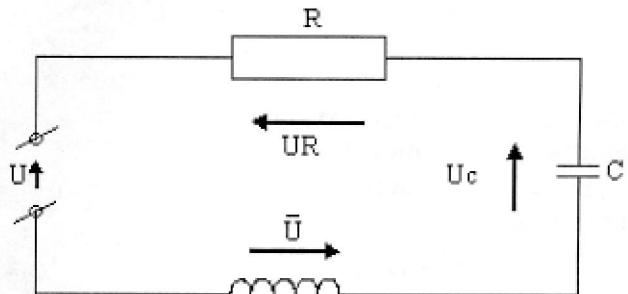


Рис. 3. Электрическая цепь R, L, C , питаемая синусоидальным напряжением $U = U_m \sin\omega t$

При этом:

$$(U_r + U_i + U_c = U_m \sin\omega t), \quad (5)$$

где $U_r = Ri$ – падение напряжения на сопротивлении; $(U_i = L \frac{di}{dt})$ – ЭДС самоиндукции катушки; $(U_c = \frac{1}{C} \int idt)$ – напряжение на конденсаторе C ; i – ток в цепи.

Таким образом,

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = U_m \sin\omega t. \quad (6)$$

Решение уравнения надо искать в виде:

$$i = J_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где i – мгновенное значение тока.

После подстановки $I(t)$ (7) в уравнение (6) получим:

$$\begin{aligned} & RJ_m \sin(\omega t + \varphi) + \\ & + \omega LJ_m \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) + \\ & + \frac{1}{\omega C} J_m \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}) = U_m \sin\omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

Известно, что синусоидальную функцию можно рассматривать как проекцию движущейся по кругу точки на ось ординат с последующей временной разверткой этой проекции на ось абсцисс, и ее можно задать в виде комплексного числа [8].

На рис. 4 показана комплексная плоскость. Координаты точки t могут быть заданы значением параметров комплексного числа I . Как известно из курса алгебры, комплексное число можно представить в различных формах;

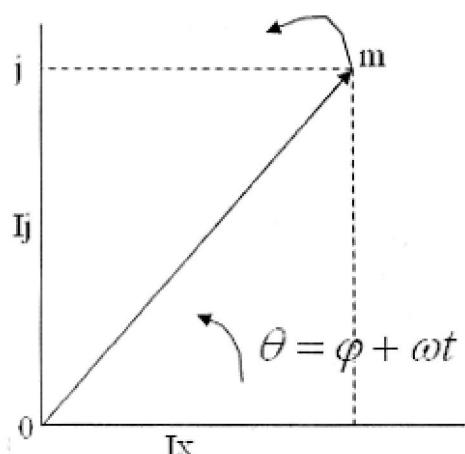


Рис. 4. Изображение на комплексной плоскости вектора I в виде комплексного числа $I = I_x + jI_y$

– показательной,
 $\hat{I} = (I)e^{j\theta} = Ie^{j\theta}$,
где $(I) = \hat{I}$ – модуль комплексного числа;
 θ – его фазовый угол;
 $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица

тригонометрической;

$$\hat{I} = I(\cos\theta + j\sin\theta)$$

алгебраической,
 $\hat{I} = I_x + jI_y$,
где I_x и I_y – проекции вектора I на оси действительных и мнимых величин, при этом $I_x = I\cos\theta$;
 $I_y = I\sin\theta$

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}.$$

В соответствии с рис. 4, синусоида есть проекция вектора $O_m = I$ на ось ординат (ось мнимых величин), равна мнимой части комплексного числа \hat{I} , т.е. $I_y = I\sin\theta$, так как можно предположить, что угол θ содержит как постоянный сдвиг фазы ϕ , так и возрастающую во времени переменную ωt , и приходим к следующему заключению: мнимая составляющая комплексного числа с линейно изменяющимся во времени аргументом отображает синусоидальную функцию

времени, а действительная составляющая комплексного числа может отображать косинусоидальную функцию времени. Поскольку мы установили возможность отображения синусоидальных и косинусоидальных функций мнимыми и действительными составляющими комплексных чисел, то после несложных преобразований можно представить уравнение (6) в комплексном виде:

$$RJ_m + j\omega LJ_m + \frac{1}{j\omega C} J_m = U_m. \quad (9)$$

Искомое значение тока имеет вид:

$$J_m = \frac{U_m}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (10)$$

Знаменатель выражения (10) является комплексным сопротивлением Z электрической цепи, схема которой представлена на рис. 1:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}. \quad (11)$$

Теперь необходимо найти фазовый угол ϕ комплексного сопротивления Z , так как $j\omega L$ и

$\frac{1}{j\omega C}$ откладывается по оси мнимых величин, то угол $\phi(\arg Z)$, можно определить через дугу синуса или дугу тангенса. Фазовый угол ϕ комплексного сопротивления Z равен

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{R}}{\omega C}, \quad (12)$$

Таким образом, электрическую цепь, в которой действуют синусоидальные ЭДС, можно расчитывать с помощью решения алгебраических уравнений с комплексными переменными, где сопротивления характеризуется комплексными величинами. Действительно, в начальной стадии твердения каналы и микропоры, заполненные минимальными примесями, являются проводниками, представляющими активные сопротивления за счет микрокапилляров, образующих сквозную структуру, где за счет движения ионов создается в порах с радиусом 0,01 мм и выше. Согласно исследованиям [5] в керамзитобетонной смеси при диаметре капилляров менее 0,01 мм вода из цементного теста отсасывается. Цементная суспензия способна проникать в капилляры диаметром более 0,05 мм, и количество ее тем меньше, чем меньше быстро гидратирующихся минералов цемента С 3А и С4 АF (активность можно этим определить, т.е. наличие алита и белита), характеризующие уменьшение величины В/Ц смеси, за счет ухода воды в поры заполнителей [6]. По мере возрастания ХСВ увеличиваются микрокристаллы и микровключения, представляющие кристаллическую структуру частиц аморфного вещества, являющимися полярным диэлектриком, у которых наблюдается увеличение индукции в области насыщения, что объясняется электронной и ионной поляризацией и при этом изменение индукции отстает от изменения напряженности поля [7]. При этом ф уменьшается, оставаясь положительным за счет роста тока I_{cm} , возникающий при изменении электрических моментов диполей, характеризующее количественное соотношение водоалюмосиликатов образующих нерастворимый гидросиликаты на поверхности контакта заполнителя с цементным тестом. Затем с ростом частоты возрастает число переориентации полярных молекул (дипольная поляризация), в результате чего возни-

кает ток абсорбции I_{ab} , опережающий напряжение на угол $\varphi < 90$ (рис. 1 (8)).

Следует заметить что I_{ab} , представляет комплексное значение тока электрической цепи (рис. 3), где знаменатель выражения (10) является комплексным сопротивлением Z . Изменение модуля $|Z|$ во времени характеризует изменение влажности. Если соединить концы вектора изменения комплексного сопротивления в комплексной плоскости, то получим траекторию движения вектора, которую принято называть годографом. Годограф комплексного сопротивления в процессе твердения находится в зависимости от состава и влажности бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Г.К. Разработка диэлектрического метода автоматического контроля качества бетона: Дис. ... к. т. н. Пермь, 1973.
2. Михайлов Г.К., Мальцева Н.И., Ким А.А. О выборе частоты измерения при исследовании диэлектрических свойств материалов с большими потерями // Сб. научных трудов ППИ, 125, 1973.
3. Кабылбекова У.М. Прогнозирование прочности легких бетонных конструкций по их электрическим характеристикам на ранних стадиях твердения. М.: Труды Московского автомобильно-дорожного института, 1990. 35-40 с.
4. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электронника: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2004. 522 с.
5. Волков Ю.С., Гончаров И.В. Электротехника и электроника. М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. 45-95 с.
6. Горчаков Т.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. М.: Стройиздат, 1986. 75-105 с.
7. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000.
8. Бугров Я.С., Никольский С.М. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функция комплексного переменного. М.: Наука, 1981.

Резюме

Бетон қоспаларының қатаю процестерін электрлік үрдісімен зерттеу мәселелері қарастырылған. Зерттеу конденсаторға орналастырылған диэлектрлік материалдардың жиілікке байланысты өзгеруі сымдылық арқылы көрсетілген. Таңдау компьютерлік модельдеу үрдісімен жасалынған. Бұл әдіс бетонның алғашқы қатаю кезеңіндегі электр-физикалық көрсеткіштерін экспресс әдісімен анықтау үшін ете қолайлы.

Summary

In the given article is designed electric model of the repeating over and over again concrete mixture and by means of schema-technical of the analysis explored frequency features element, which nonlinear characteristic reveal itself on radio frequency. On result of the studies is installed that, on measure of the reduction to moisture of the concrete conductivity have a complex nature, and its possible present in the manner of vector of the complex resistance Z with angular factor. On

experimental given as of schema-technical of the analysis possible to conclude that godofraph vector it is enough packed characterizes the process of the repeating over and over again as a whole and presents practical value in forecasting physico-mechanical characteristic of the concrete and allows to produce express checking.

УДК 666.982.4

ЕНУ им. Л. Н. Гумилева,
г. Астана

Поступила 31.03.10г.