

05

## Влияние температуры на параметры электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении гетерогенных строительных материалов

© Т.В. Фурса,<sup>1</sup> К.Ю. Осипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: fursa@tpu.ru

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634021 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 5 декабря 2012 г.)

Изучены основные закономерности влияния температуры цементно-песчаных образцов на параметры электрического отклика при их импульсном механическом возбуждении. Установлена связь упругих и электрических характеристик образцов с параметрами электрического сигнала в диапазоне температур от 30 до  $-40^{\circ}\text{C}$ . Результаты проведенных исследований являются исходными данными для разработки алгоритма неразрушающего механоэлектрического контроля структурных и механических характеристик гетерогенных материалов, имеющих различную температуру и влажность.

Широкое применение на практике гетерогенных строительных материалов и их использование в различных конструкциях предъявляют к ним высокие требования по запасу прочности. Недостатки существующих методов определения текущей дефектности и прочности материала конструкции, а следовательно, и всей конструкции в целом заставляют искать новые методы неразрушающего контроля. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических материалах при квазиупругом ударном возбуждении [1–8]. На основе наших исследований установлены закономерности связи параметров электрического отклика на ударное возбуждение со структурными характеристиками бетона [9–14], и разработан метод определения прочности образцов бетона [15], который по точности превосходит известные механические методы.

Для усовершенствования неразрушающего механоэлектрического метода контроля прочности наружных строительных конструкций, температура которых может претерпевать значительные изменения, требуется проведение исследований влияния температуры на параметры механоэлектрических преобразований.

Исследования выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение материалов и регистрацию электрического сигнала. Ударное возбуждение осуществляется с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара. Для того чтобы исключить локальные нарушения в зоне соприкосновения бойка ударного устройства с образцом, удар производится через металлическую пластину, закрепленную на корпусе ударного устройства. Для регистрации электрического сигнала используется дифференциальный электрический датчик, позволяющий су-

щественно повысить соотношение сигнал–помеха. Измерительный приемник располагается на расстоянии 2 mm от поверхности образца, а компенсационный — параллельно измерительному на высоте 30 mm от него. В непосредственной близости с приемниками для снижения потерь сигналов в проводах на корпусе ударника закреплена плата с согласующей электроникой для передачи измеренных сигналов на регистрирующую систему. Сигнал с электрического датчика регистрируется с помощью многофункциональной платы ввода-вывода „NI PCI-6251“, позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала. Измерение продольных акустических колебаний производилось с помощью стандартного пьезопреобразователя П111. Для измерения влажности использовался влагомер строительных конструкций и материалов ВСКМ-12У. Измерения электрического сопротивления проводились с помощью стандартного прибора автоматического мостового измерителя иммитанса Е7-14. Изменение температурных условий создавалось с помощью климатической камеры Feutron, позволяющей осуществлять изменение температуры окружающей среды в диапазоне от 50 до  $-100^{\circ}\text{C}$  и поддержание заданной температуры в течение длительного времени. В рамках настоящей работы проведены исследования в диапазоне температур от 30 до  $-40^{\circ}\text{C}$ , что соответствует реальному климатическому изменению температур.

Исследования проводились на цементно-песчаных материалах, из которых состоит пористая матрица в бетонах. В рамках исследований были испытаны образцы размером  $50 \times 50 \times 100$  mm, имеющие различную влажность. Одни образцы (в количестве 3 штук) после окончания процесса твердения длительное время хранились в комнатных условиях и имели влажность  $\sim 1.5\%$ . Другие 3 образца, идентичные по составу первым, замачивались

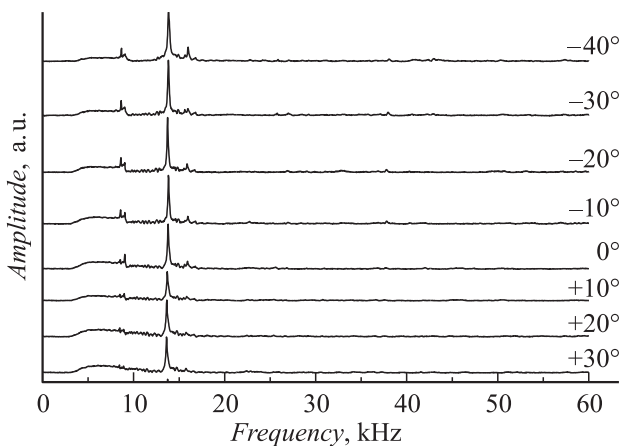
в воде на сутки, после чего они имели влажность  $\sim 10\%$ . Испытание каждого из образцов, обладающих различной влажностью, производилось в климатической камере в процессе температурного воздействия в диапазоне от  $30$  до  $-40^\circ\text{C}$ . Измерение электромагнитного отклика на ударное возбуждение производилось через  $10^\circ\text{C}$  после выдержки образцов при каждой температуре в течение  $30$  min. Используемое в экспериментах слабое ударное воздействие, осуществляемое через подложку, даже при многократном возбуждении образца не приводит к его разрушению. Для исключения влияния некоторой не идентичности механического возбуждения, осуществляемого с помощью электромеханического ударного устройства, производилось измерение электромагнитного отклика по 3 раза с последующим усреднением.

Типичная картина изменения спектральных характеристик электрического сигнала из цементно-песчаного образца, имеющего влажность  $1.5\%$ , в диапазоне температур от  $30$  до  $-40^\circ\text{C}$  приведена на рис. 1.

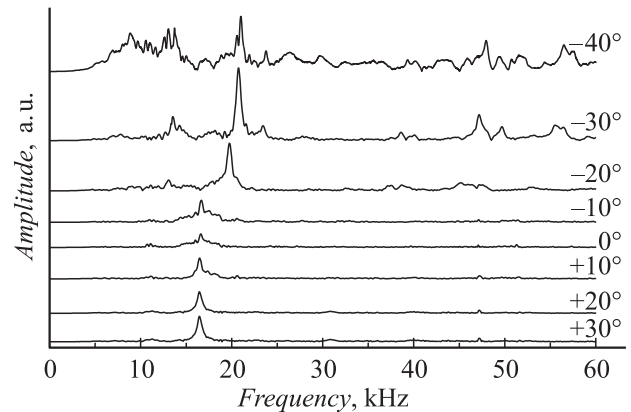
Из рисунка видно, что изменение температуры не оказывает существенного влияния на спектральные характеристики электрических откликов из образца, имеющего небольшую влажность. Спектр сигнала имеет достаточно простой вид, в котором присутствует практически один спектральный пик, соответствующий первой гармонике продольных акустических колебаний в направлении ударного возбуждения.

Значительно иная картина наблюдается для влажного образца при изменении температуры в этом же диапазоне. На рис. 2 приведена динамика изменения с температурой спектральных характеристик электрического отклика из образца, имеющего влажность  $10\%$ .

При замораживании влажного образца регистрируется отклик, имеющий основной максимум, также соответствующий первой гармонике продольных акустических колебаний в направлении возбуждения. Но наряду с этим при снижении температуры ниже  $-20^\circ\text{C}$  в нем появляются дополнительные боковые, относительно глав-



**Рис. 1.** Изменение амплитудно-частотных характеристик электрического сигнала в зависимости от температуры (для образца с влажностью  $1.5\%$ ).



**Рис. 2.** Изменение амплитудно-частотных характеристик электрического сигнала в зависимости от температуры (для образца с влажностью  $10\%$ ).

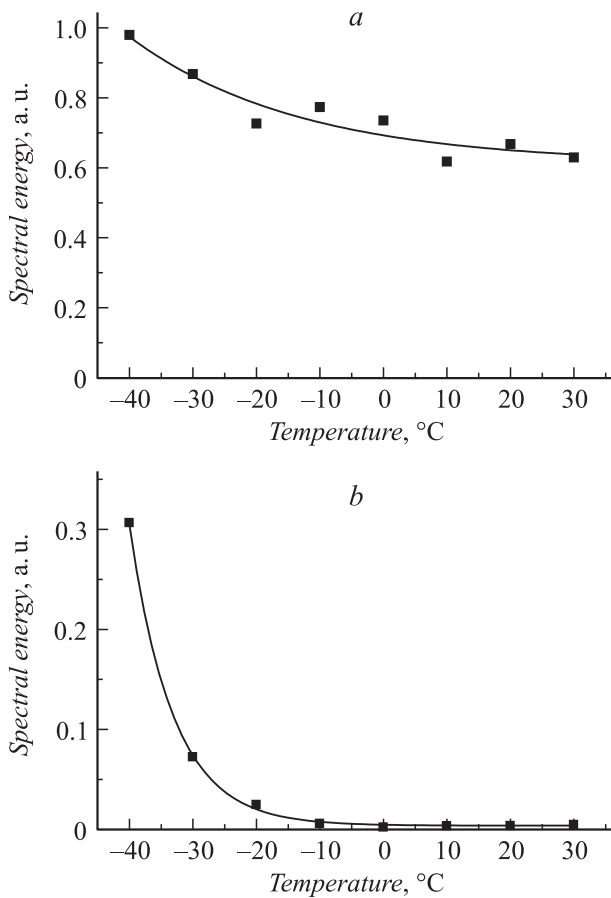
ного, спектральные максимумы значительной величины, как в низко-, так и высокочастотной области, что связано с процессами рассеяния акустических волн на порах с замороженной в них водой. Изменение волновой картины в замороженных материалах приводит к трансформации электрического сигнала, возбуждаемого этим волновым полем.

Для количественной оценки изменений в спектральном составе электрических откликов была использована величина суммарной спектральной энергии электрического сигнала в диапазоне частот от  $0$  до  $60$  kHz. На рис. 3, *a* приведена зависимость суммарной спектральной энергии от температуры для цементно-песчаного образца, влажность которого составляла  $1.5\%$ , а на рис. 3, *b* — для влажности  $10\%$ .

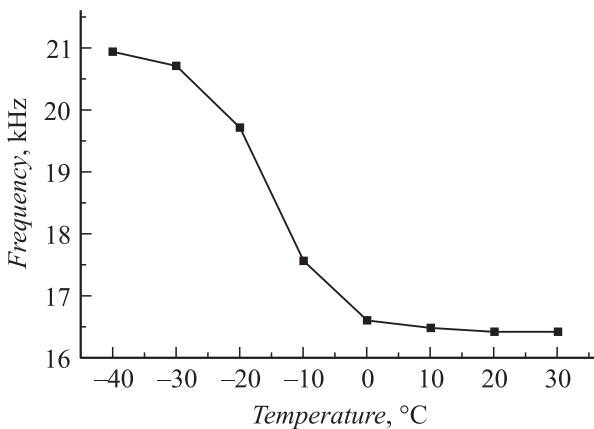
Из рисунка видно, что характер изменения плотности спектральной энергии электрического отклика из цементно-песчаных образцов с влажностью  $1.5$ , и  $10\%$  при изменении температуры значительно отличается.

В сухом образце с влажностью  $1.5\%$  происходит в целом увеличение (в  $1.5$  раза) спектральной энергии сигнала при снижении температуры и переходе ее в отрицательную область (рис. 3, *a*). На образцах же с  $10\%$  влажностью (рис. 3, *b*) при переходе в отрицательную область температур наблюдаем весьма значительные изменения спектральной энергии электрического отклика (приблизительно в  $100$  раз). Связано это в первую очередь с процессами изменения проводимости и упругих характеристик материала, которые сопровождают замораживание воды, заполняющей пористую структуру образцов.

Наряду с возрастанием спектральной энергии при замораживании цементно-песчаных образцов происходит также смещение частоты основного спектрального максимума электрического сигнала в более высокочастотную область. На рис. 4 приведена зависимость частоты основного спектрального максимума от температуры для цементно-песчаного образца, имеющего влажность  $10\%$ .



**Рис. 3.** Зависимость спектральной энергии электрических сигналов из образцов цементно-песчаного материала различной влажности (*a* — 1.5%, *b* — 10%) от температуры.



**Рис. 4.** Зависимость частоты спектрального максимума электрического сигнала от температуры.

Возрастание частоты основного максимума электрического сигнала, соответствующего первой гармонике продольных акустических колебаний в образце, согласуется с изменением скорости звука в материале и связано с замерзанием воды в капиллярных порах. Зависимость частоты электрического сигнала с понижением темпе-

ратуры имеет немонотонный вид, так как известно [16], что при переходе в область отрицательных температур происходит замерзание воды сначала в более крупных, а затем с понижением температуры все в более мелких порах. Поэтому характер изменения частоты основного спектрального максимума с температурой должен отражать характеристики поровой структуры — диаметр пор и их концентрацию.

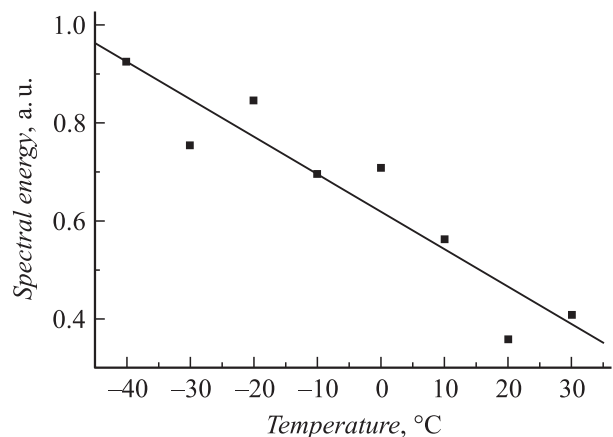
В отличие от электрического отклика акустический сигнал, измеренный из образца, имеющего влажность 10%, в диапазоне от 30 до  $-40^{\circ}\text{C}$  не претерпевает столь значительных изменений в спектральном составе (рис. 5).

Из рисунка видно, что изменение спектральной энергии акустического сигнала при охлаждении образца имеет тенденцию к возрастанию с некоторыми особенностями в различных температурных интервалах, которые авторы в рамках настоящей работы не исследовали. Следовательно, изменение температуры в исследованном диапазоне мало влияет на энергию продольных акустических колебаний, формирующихся в цементно-песчаных образцах при ударном возбуждении и не определяет изменение энергии электрического сигнала.

Наряду с этим в процессе замораживания влажного пористого материала изменяется проводимость материала при замерзании воды, содержащейся в порах.

Были проведены исследования характера изменения удельного электрического сопротивления из цементно-песчаных образцов в процессе их замораживания. Измерения электрического сопротивления проводились на цементно-песчаном образце размером  $50 \times 50 \times 6 \text{ mm}$  с помощью стандартного прибора автоматического мостового измерителя иммитанса Е7-14 в климатической камере по тому же режиму, как и измерения электрического сигнала (см. таблицу).

Как видно из таблицы, снижение температуры в диапазоне от 20 до  $-40^{\circ}\text{C}$  приводит к возрастанию удельного сопротивления: для образца с влажностью 1.5% в 2.5 раза, а при влажности 10% на два порядка.



**Рис. 5.** Зависимость спектральной энергии акустических сигналов от температуры.

Значения удельного электрического сопротивления, измеренные в процессе охлаждения цементно-песчаных образцов, имеющих влажность 1.5 и 10%

Температура, °C	$\rho, \Omega \cdot \text{m}$	
	Влажность, %	
	1.5	10
20	$3.9 \cdot 10^6$	$2.81 \cdot 10^2$
10	$4.5 \cdot 10^6$	$1.88 \cdot 10^2$
0	$4.54 \cdot 10^6$	$2.11 \cdot 10^2$
-10	$6.16 \cdot 10^6$	$2.66 \cdot 10^2$
-20	$7.17 \cdot 10^6$	$6.96 \cdot 10^3$
-30	$8.29 \cdot 10^6$	$1.36 \cdot 10^4$
-40	$9.7 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^4$

По порядку величины удельного электрического сопротивления и характеру ее изменения в области отрицательных температур полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов [17].

Значительное увеличение удельного электрического сопротивления в процессе замораживания материала, начиная с температуры  $-10^\circ\text{C}$ , является следствием

замораживания воды, содержащейся в порах. При замораживании происходит постепенный переход воды в лед, вначале замерзает влага, находящаяся в наибольшем удалении от стенок пор. При этом роль ионов, соответствующих свободному раствору, значительно снижается и электропроводность падает. Постепенный переход воды в лед означает изменение пористой структуры бетона. Структура становится более тонкопористой, что также приводит к увеличению удельного электрического сопротивления.

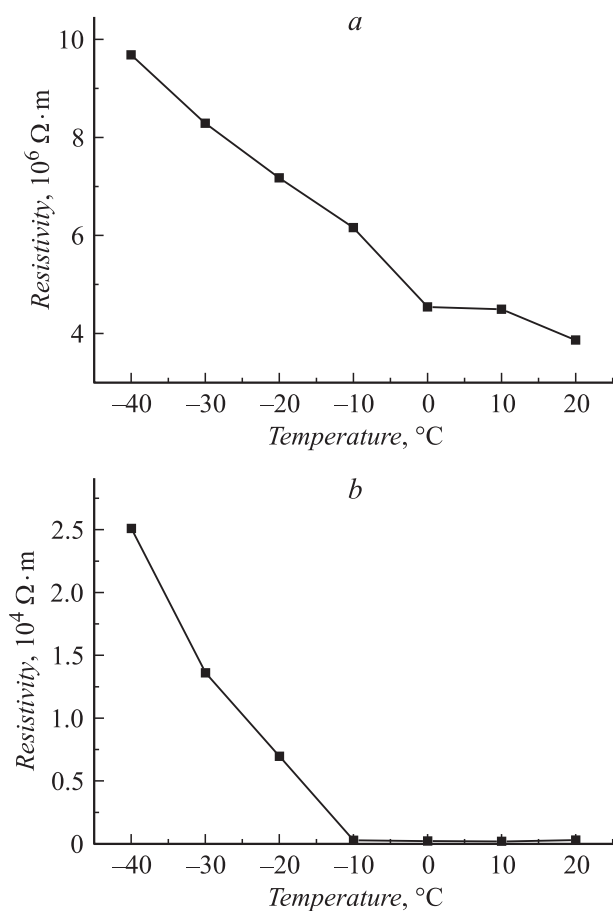
На рис. 6 приведены зависимости удельного электрического сопротивления цементно-песчаного материала от температуры при влажности материала: *a* — 1.5% и *b* — 10%

Высокая корреляция характера изменения спектральной энергии электрического отклика (рис. 3) и удельного электрического сопротивления материала при его замораживании (рис. 6) свидетельствует о снижении эффекта экранирования источников электромагнитного поля окружающим их проводящим цементным камнем с повышением его удельного электрического сопротивления. Подробно эффект экранирования источников электромагнитного поля рассмотрен в работе [18].

Следовательно, на эффективность механоэлектрических преобразований в процессе замораживания цементно-песчаных материалов наибольшее влияние оказывает изменение их проводимости.

Полученные закономерности изменения параметров электрического отклика на ударное возбуждение при изменении температуры будут использоваться при разработке неразрушающего метода контроля материалов, находящихся в различных температурно-влажностных условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“ (№ 7.1826.2011).



**Рис. 6.** Зависимости удельного электрического сопротивления образцов цементно-песчаного материала различной влажности (*a* — 1.5%, *b* — 10%) от температуры.

## Список литературы

- [1] Фурса Т.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 53–56.
- [2] Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 1. С. 57–61.
- [3] Суржиков А.П., Фурса Т.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 4. С. 71–76.
- [4] Фурса Т.В., Савельев А.В., Осипов К.Ю. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 59–63.
- [5] Фурса Т.В., Дани Д.Д. // ЖТФ. 2011. Т. 91. Вып. 8. С. 53–58.
- [6] Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Дефектоскопия. 2003. № 10. С. 33–37.
- [7] Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 19. С. 61–68.
- [8] Фурса Т.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 1–6.
- [9] Фурса Т.В., Суржиков А.П., Гольд Р.М. // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 20–22.
- [10] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Романов Д.Б. // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 23–26.
- [11] Фурса Т.В., Найден Е.П., Осипов К.Ю., Усманов Р.У. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 12. С. 52–55.

- [12] *Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю.* // Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 27–34.
- [13] *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Дани Д.Д.* // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 39–47.
- [14] *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Дани Д.Д.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 7. С. 1–7.
- [15] *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Дани Д.Д.* Способ контроля прочности изделий из твердых материалов. Пат. 2453824. РФ МПК7 G 01 N 3/32. Оpubл. 20.06.2012. Бюл. 17.
- [16] *Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин Л.Н.* Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. М.: 1968. 167 с.
- [17] *Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А.* Электрические свойства бетона. М.: Энергия, 1980. 206 с.
- [18] *Фурса Т.В., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Дани Д.Д.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 63–67.