

УДК 539.2; 541.1; 542.269

к.т.н. Клапченко В.И.,  
к.ф.-м.н. Краснянский Г.Е., доцент Азнаурян И.А.,  
к.ф.-м.н. Дугинов В.Е.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДИФФУЗИИ ВЛАГИ И ЛЬДИСТОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ БЕТОНА

*Показана возможность определения морозостойкости строительных материалов путем независимого измерения кинетики диффузии влаги и льдистости в процессе одностороннего замораживания образцов.*

Морозостойкость строительных материалов в настоящее время определяется действующими нормативными документами, в основе некоторых лежит стандартный метод фиксации числа циклов попеременного замораживания и оттаивания, выдерживаемых специально изготовленными образцами без потери эксплуатационных качеств (снижение прочности, видимые повреждения и др.).

Однако, такой подход не всегда соответствует требованиям производства строительных материалов, а также к долговечности зданий и сооружений и имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, прямое измерение морозостойкости (МРЗ) материалов в циклах требует специального оборудования и больших затрат времени (до нескольких месяцев), что не позволяет эффективно управлять технологическим процессом изготовления строительных материалов с заданной морозостойкостью.

Во-вторых, детальное сопоставление результатов лабораторных испытаний МРЗ бетонов и сроков их службы в реальных сооружениях не позволяет в общем случае установить между ними прямое соответствие. В связи с этим, чрезвычайную актуальность приобретают исследования, посвященные разработке ускоренных методов определения морозостойкости [1].

Новые методы должны устранить основную трудность указанной проблемы, состоящую в несоответствии условий лабораторных исследований тем реальным условиям, в которых находится данный материал в эксплуатируемых конструкциях и сооружениях. Прежде всего, это связано с тем, что в большинстве случаев реальные конструкции подвержены одностороннему замораживанию, а корреляционная взаимосвязь этого процесса с процессом всестороннего замораживания до сих пор не найдена.

Авторами ряда работ [2, 3, 4] были предприняты попытки связать МРЗ бетона с соотношением объема макро- и микропор. Ими предложен метод вы-

числення морозостойкости по кинетике одностороннего водонасыщения. Однако, на наш взгляд, для более детального изучения механизмов морозного разрушения строительных материалов необходимо одновременно иметь информацию о кинетике миграции влаги в процессе одностороннего замораживания (включая термовлагодиффузию к холодной поверхности образца) и кинетике льдообразования.

В настоящей работе показана возможность определения МРЗ строительных материалов комбинированным методом независимого измерения кинетики диффузии влаги и льдистости в процессе одностороннего замораживания образцов.

Экспериментально исследовали образцы-балочки цементно-песчаного раствора (ЦПР) размером  $4 \times 4 \times 16$  см с В/Ц=0,5 на портландцементе М400 в возрасте 28 суток. Образцы разделяли на две половины, на верхнюю и нижнюю грань которых вживлялись электроды из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм на расстоянии 1 см друг от друга.

Измерения электропроводности (ЭП) проводили при одностороннем замораживании образцов. Перед измерением часть образцов насыщалась водой при комнатной температуре в течение 48 часов, а часть выдерживалась на воздухе. Фиксацию прохождения влаги проводили методом солевой метки, для чего теплый торец образца-балочки увлажняли 4% раствором хлористого натрия в воде.

Как показали результаты измерений, ЭП образца ЦПР, находившегося до опыта в условиях воздушного хранения, изменяется в различных сечениях образца по различным законам.

Так, в зоне первой электродной пары ЭП в течение 1 часа медленно уменьшается, затем в интервале от 1,5 ч до 3 ч испытывает резкий спад и в дальнейшем продолжает незначительно понижаться. Подобный же характер имеет и зависимость  $\sigma(t)$  для второй электродной пары – медленное уменьшение  $\sigma$  до  $t \approx 3,5$  ч, резкий спад при  $t = 3,5 \div 5,5$  ч. В то же время, в зоне третьей пары электродов ЭП с течением времени практически не изменяется. Такие же зависимости  $\sigma(t)$  наблюдаются и для водонасыщенного образца с той лишь разницей, что изменение ЭП, происходящее в соответствующие временные интервалы, гораздо менее выражены.

Ниже показано, что отмеченные особенности поведения ЭП могут быть интерпретированы на основании существующих представлений о кинетике льдообразования и термовлагопроводности в капиллярно-пористых материалах [5,6].

В начальный момент времени температура одинакова по всей длине образца, а влага в его порах находится в равновесном состоянии. Этому соответствуют почти совпадающие значения  $\sigma$  для всех сечений образца. В дальнейшем процесс льдообразования, начинающийся от холодной грани образца, со-

проводиться установлением градиента температуры и возникновением термо- и концентрационной диффузии влаги и солевого раствора. При этом соответствующие диффузионные потоки направлены в сторону, противоположную направлению распространения фронта льдистости.

Известно, что при изменении температуры ЭП цементного камня и бетона изменяется по закону [5]:

$$\sigma = a \exp(bt),$$

где **a** и **b** - постоянные коэффициенты, **t** – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Таким образом, уменьшение температуры в данном сечении образца с течением времени должно приводить и к падению ЭП. ЭП должна уменьшиться также вследствие понижения влагосодержания в соответствующей зоне, обусловленного термовлагопереносом. Меньшая температура и больший градиент температуры вблизи холодной грани образца вызывают такое перераспределение влаги по объему образца, что возникает градиент концентраций, совпадающий по направлению с градиентом температуры. В то же время, указанное уменьшение влагосодержания может компенсироваться оттеснением в рассматриваемую область не замерзшей воды при льдообразовании. Наблюдающееся незначительное понижение ЭП на начальном этапе охлаждения свидетельствует о преобладающем вкладе первых двух из описанных механизмов.

Скачкообразное уменьшение ЭП, начинающееся для сечения 1 при  $t \cong 1,5$  ч и сечения 2 при  $t \cong 3,5$  ч, указывает на достижение этих сечений фронтом льдистости. Действительно, удельная ЭП льда на 3–4 порядка меньше удельной ЭП воды. Менее резкие изменения ЭП, наблюдаемые на опыте для образца с относительным влагосодержанием  $W < 1$ , объясняются, по-видимому, увеличением сечения каналов, обусловленным повышением объема поровой влаги при ее переходе в лед. Еще меньшее (менее чем на порядок) изменение ЭП в указанном интервале зависимости  $\sigma(t)$  для водонасыщенного образца может быть объяснено на основании гипотезы гидростатического давления льда Пауэрса, экспериментально подтвержденной В.М. Валентой [6]. При замораживании бетона с  $W = 1$  лед, образующийся в поверхностной зоне, создает повышенное давление в оттесненной жидкой фазе, в результате чего понижается температура льдообразования. Вследствие этого, при той же температуре, льдистость водонасыщенного бетона должна быть ниже и ее вклад в изменение ЭП, соответственно, уменьшается.

Анализ экспериментальных данных позволяет заключить, что за время измерений фронт льдистости не достигает зоны третьей электродной пары, хотя, судя по кинетике льдообразования, продолжительность опыта для этого может быть достаточной. Указанное обстоятельство объясняется, по-видимому, тем, что ко времени окончания измерений в указанной зоне увеличивается кон-

центрация соли, поступающей от увлажняемой грани образца, что приводит к замедлению процесса замерзания.

Сопоставление наших результатов с данными [6] показывает, что продолжительность измерений достаточна также для установления постоянного градиента температуры вдоль образца. В то же время, даже в сечении 1 ЭП с течением времени продолжает уменьшаться. Это указывает на большое время релаксации при льдообразовании в исследуемой системе.

Как показали результаты измерений, ЭП в зонах 6-ой и 7-ой электродных пар в течение, соответственно, 1 ч и 3 ч, значительно возрастает, практически стабилизируясь впоследствии. В зоне 5-ой электродной пары ЭП начинает увеличиваться лишь по истечении  $\approx 3$  ч, несколько убывая в начальные моменты времени. Поскольку, как показано выше, за время измерений фронт льдистости не распространяется дальше 3-ей электродной пары, указанное поведение ЭП должно отражать кинетику массопереноса в ЦПР при наличии градиента температуры.

Исследования показали, что изменения ЭП в соответствующих сечениях водонасыщенного образца происходят значительно медленнее и величина их значительно меньше. Для объяснения этих особенностей необходимо учесть, что изменение влагосодержания в сечениях образца при  $W=1$ , может быть обусловлено лишь термовлагопроводностью, роль которой при высоких температурах и низких градиентах температуры в рассматриваемой области образца (сечения 6 и 7), должна быть невелика. При этом, движение солевой метки происходит за счет диффузии соли от увлажняемой грани образца. Таким образом, увеличение ЭП в сечении 7 связано, по-видимому, в основном с повышением концентрации соли, а уменьшение ЭП в сечениях 5 и 6 должно происходить вследствие понижения температуры.

Сопоставляя результаты измерений, можно заключить, что средняя скорость фронта льдистости при одностороннем замораживании образца ЦПР исследованного состава не зависит от исходного влагосодержания и за 6 часов после начала замораживания составляет  $\approx 0,4$  см/ч. В то же время, средняя скорость солевой метки в таком образце за такой же промежуток времени уменьшается при насыщении образца водой, изменяясь от  $\approx 0,5$  см/ч для образца воздушного хранения до  $\approx 0,2$  см/ч для образца, подвергнутого водонасыщению в течение 48 ч.

Таким образом, в образцах, подвергнутых одностороннему замораживанию (т.е. максимально приближенным к реальным условиям эксплуатации в строительных конструкциях), проходят интенсивные процессы массопереноса. При этом, разработанный комбинированный метод независимого измерения кинетики диффузии влаги и льдистости позволяет определить скорости распро-

странения фронта льдообразования и влагопроводности (включая термовлагопроводность по А.В. Лыкову) в зависимости от состава (капиллярно-пористой структуры) образцов ЦПР и начальных условий их хранения. Такая информация может дать более достоверную картину поведения бетона при знакопеременной температурной нагрузке в условиях различного начального влагосодержания (в том числе в гидротехнических сооружениях), чем это предусмотрено действующими нормативными документами. Кроме того, экспрессность измерений позволяет использовать метод для эффективного управления технологией создания строительных материалов с заданными свойствами.

### Литература

1. Казанский В.М., Краснянский Г.Е., Новоминский В.А. Кинетика льдообразования и термовлагопроводности в бетоне. – В кн.: Научные исследования и их внедрение в строительной отрасли. Тез. докл. науч.-техн. конф. – Саранск, 1989, с.23.
2. Александровский С.В., Александровский В.С. Базовая математическая модель теории промерзания влажных пористых тел.- Бетон и железобетон, 2005, №6, с. 20-22.
3. Fen-Chong T. Freezing and thawing porous media – experimental study with dielectric capacitive method. – Comptes Rendus Mecanique, 2005, vol. 333, p.405-430.
4. Чеховский Ю.В., Лифшиц А.В. Ускоренные методы определения морозостойкости бетона. – Промышленность строительных материалов. – М.: 1986, Серия 3, выпуск 1. – 45с.
5. Бернацкий А.Ф. и др. Электрические свойства бетона. – М.: Энергия, 1980. – 208с.
6. Ефименко Ю.В., Некипелов И.Н. Электропроводность замерзающего бетона.: В кн. Местные строительные материалы. – Омск, 1985, с.30-37

### Анотація

Показана можливість визначення морозостійкості будівельних матеріалів шляхом незалежного вимірювання кінетики дифузії вологи і льодистості в процесі одностороннього заморожування зразків.

### Annotation

The possibility to determine the frost resistance of building materials by an independent measurement of the moisture diffusion and ice content kinetics in the process of unilateral freezing of the samples was shown.