

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ВЛАГОПЕРЕНОС ПРИ ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

### АННОТАЦИЯ

В работе приведены экспериментальные данные по влагопереносу в пористых материалах при различных тепло-влажностных условиях. Определено влияние температуры пористого материала на интенсивность его увлажнения.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пористые материалы активно применяются во многих областях науки и техники. В тоже время основные эксплуатационные свойства данных материалов зависят от интенсивности происходящих в них процессов тепло- и массопереноса [1]. В качестве примера можно привести применение в строительстве пористых материалов с высокими теплоизоляционными свойствами. Теплозащитные свойства этих материалов в значительной степени зависят от их тепловлажностного состояния [2]. Процессы теплопереноса и влагопереноса в пористых материалах взаимосвязаны, поэтому необходимо учитывать их взаимное влияние друг на друга. Аналитическое описание данных процессов достаточно сложно, а расчетные методы имеют ограничения, так как не учитывают многие факторы, влияющие на процессы. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований тепло- и влагопереноса в пористых материалах.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В Институте теплофизики СО РАН была создана установка для экспериментального изучения совместного тепло- и влагопереноса в пористых материалах при различных тепловлажностных условиях. Схема установки представлена на рис. 1.

Основная часть установки состояла из трех блоков: верхнего, среднего и нижнего. Верхний и нижний блоки аналогичны по конструкции и представляли собой металлические теплообменники, теплоизолированные снаружи. Внутри теплообменников располагались камеры прямоугольной формы, одна поверхность которых была открыта для контакта со средним блоком установки. К теплообменникам верхнего и нижнего блоков подключались термостаты. В результате, с помощью термостатов можно было устанавливать необходимую температуру воздуха в камерах. Необходимая влажность воздуха в камерах поддерживалась при помощи емкостей с водой, сорбентом или растворами солей. Таким образом, данная установка позволяла регулировать температуру воздуха в камерах в диапазоне от  $-30$  до  $+80$  °С, и влажность воздуха от 0 до 100%.

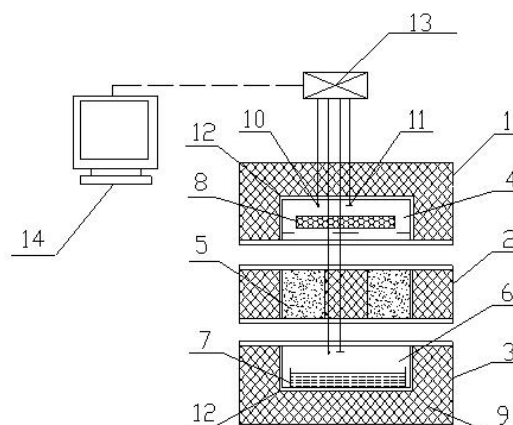


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — верхний блок; 2 — средний блок; 3 — нижний блок;  
4 — верхняя камера; 5 — образец; 6 — нижняя камера;  
7 — емкость с водой; 8 — сорбент; 9 — теплоизоляция;  
10 — термогигрометры; 11 — датчики температуры;  
12 — теплообменник; 13 — АЦП; 14 — ПЭВМ

Средний блок экспериментальной установки также был теплоизолирован по периметру и представлял собой металлическую обойму, внутри которой размещались образцы исследуемого материала. Таким образом, при соединении всех блоков установки вместе, образцы исследуемого материала оказывались тепло- и влагоизолированы по бокам, а торцевые их поверхности выходили в камеры верхнего и нижнего блоков установки. В результате, поддерживая в камерах установки определенные температуру и влажность воздуха, на границах образцов создавались необходимые тепловлажностные условия. В данную установку одновременно помещались несколько образцов исследуемого материала. Кроме того, созданная установка позволяла проводить эксперименты на образцах материала различной формы.

В верхней и нижней камерах установки находились датчики термогигрометров для измерения температуры и влажности воздуха. Дополнительно по высоте образца были размещены датчики температуры. Вся информация с датчиков температуры и термогигрометров поступала через АЦП на персональный компьютер (ПЭВМ). Это позволяло контролировать изменение тепловлажностных условий в течение эксперимента.

### 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по исследованию тепло- и влагопереноса в пористом материале проводились при

сорбционном увлажнении материала, то есть при поглощении паров воды из воздуха. Во время эксперимента через определенные промежутки времени измерялось распределение влаги по высоте образца. При исследовании влагопереноса в пористых материалах целесообразно применение бесконтактных методов, поскольку они позволяют определять распределение влаги в материале в короткие сроки и без его разрушения. Для сравнительного анализа различных методов исследования влагопереноса, распределение влаги в образцах определялось параллельно методом разрезной колонки [3] и бесконтактным гамма-методом [4].

Метод разрезной колонки является стандартным весовым методом. Он заключается в том, что образец исследуемого пористого материала перед экспериментом предварительно разрезался на равные по высоте слои, которые потом плотно соединялись между собой. После эксперимента каждый слой образца взвешивался во влажном состоянии, и высушивался до постоянной массы. Это позволяло определить влажность каждого слоя образца и получить распределение влаги по высоте образца.

Используемый в данной работе гамма-метод основывается на определении влажности материала по ослаблению узкого пучка гамма-излучения при его прохождении через материал [5]. При исследовании процессов влагопереноса в пористом материале необходимо также учитывать тот факт, что ослабление гамма-излучения в данном случае происходит, во-первых, за счет скелета самого материала, а, во-вторых, за счет воды, содержащейся в порах материала. Поэтому перед экспериментом предварительно определялось ослабление гамма-излучения в сухом материале. После эксперимента увлажненный образец просвечивался пучком гамма-излучения в различных по высоте сечениях и определялась влажность материала в соответствующих сечениях образца. Таким образом, получали распределение влаги по высоте образца.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве исследуемого пористого материала в экспериментах использовался автоклавный газобетон плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$  и пористостью около 80 %. Образцы газобетона имели форму параллелепипеда с поперечным сечением  $50 \times 100 \text{ мм}$  и высотой 100 мм. Перед экспериментом образцы помещались в вакуумный сушильный шкаф и высушивались до постоянной массы при температуре около  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Затем, боковые поверхности образцов влагоизолировались, для достижения в эксперименте одномерности процесса влагопереноса. После этого подготовленные образцы помещались в средний блок экспериментальной установки. В это время в камерах верхнего и нижнего блоков установки поддерживались необходимые температура и влажность воздуха. Началом эксперимента считался момент соединения блоков установки, то есть момент создания на границе образца постоянных тепловлажно-

стных условий. Во всех экспериментах тепловлажные условия на нижней границе образца были одинаковыми: поддерживалась температура  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  и создавалась 100 %-я относительная влажность воздуха, что соответствовало абсолютной влажности воздуха  $200 \text{ г/м}^3$ . На верхней границе образца тепловлажные условия были различными в зависимости от условий эксперимента.

Первоначально был проведен эксперимент по исследованию влагопереноса в материале при отсутствии перепада температуры между воздухом на нижней и верхней границах образца. Соответственно на верхней границе образца поддерживалась температура  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  и нулевая относительная влажность воздуха. Таким образом, увлажнение материала происходило за счет перепада влажности, а направление влагопереноса в образце было от его нижней поверхности к верхней. В результате по высоте образца отсутствовал градиент температуры. При этом температура материала поддерживалась не ниже точки росы, чтобы исключить конденсацию влаги в образце. Полученные распределения влаги по высоте образца в различные моменты времени с начала процесса влагопереноса представлены на рис. 2.

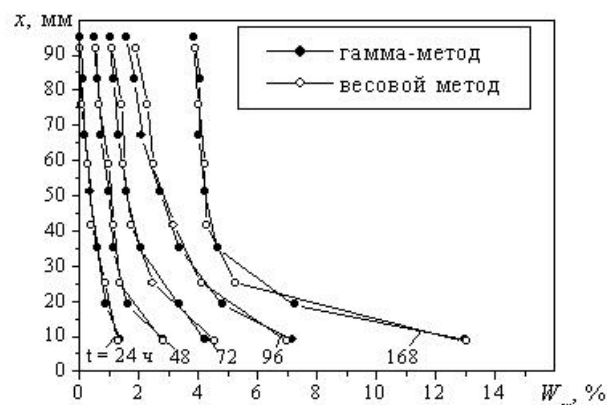


Рис. 2. Распределение влаги в образце газобетона при отсутствии градиента температуры по высоте образца

Из данного рисунка следует, что с течением времени происходило изменение распределения влаги в образце, что свидетельствует о постепенном увлажнении образца. При этом увлажнение материала в верхней части образца заметно отставало от увлажнения в нижней части. На данном рисунке представлены осредненные результаты распределения влаги по нескольким образцам, полученные как методом разрезной колонки, так и гамма-методом. Можно заметить, что результаты, полученные разными методами, удовлетворительно согласуются между собой.

В следующем эксперименте температура воздуха на верхней границе была снижена до  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , при нулевой влажности воздуха. В результате перепад температуры между воздухом в нижней и в верхней камерах составил  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , при этом перепад влажности воздуха остался прежним. Таким образом, по высоте образца был создан небольшой градиент температуры, при этом температура внутри образца пони-

зилась ниже точки росы. Результаты эксперимента при данных тепловлажностных условиях представлены на рис. 3.

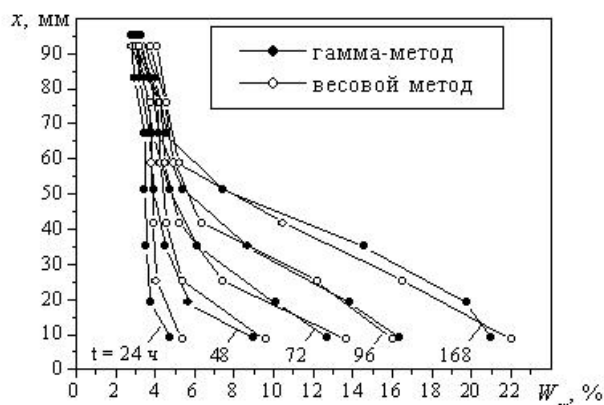


Рис. 3. Распределение влаги в образце газобетона при малом градиенте температуры по высоте образца

Из данного рисунка видно, что при наличии небольшого градиента температуры увлажнение материала на нижней границе образца происходило более интенсивно, чем в первом эксперименте (см. рис. 2.). Этот рисунок также иллюстрирует хорошее совпадение профилей распределения влаги, полученных методом разрезной колонки и гамма-методом.

Следующим этапом работы было проведение экспериментов по исследованию влагопереноса в пористом материале при значительном перепаде между температурой воздуха в нижней и верхней камерах. С этой целью температура воздуха на верхней границе образца была снижена до 20 °С. При этом абсолютная влажность воздуха в верхней камере в течение всего эксперимента поддерживалась равной 10 г/м<sup>3</sup>. В результате перепад температуры между воздухом в нижней и в верхней камерах составил 50 °С, а перепад влажности воздуха практически не изменился по сравнению с предыдущими экспериментами. Таким образом, по высоте образца был создан большой градиент температуры, а температура всего образца была значительно ниже точки росы, что могло привести к конденсации влаги внутри образца. Результаты эксперимента по увлажнению материала при значительном градиенте температуры представлены на рис. 4.

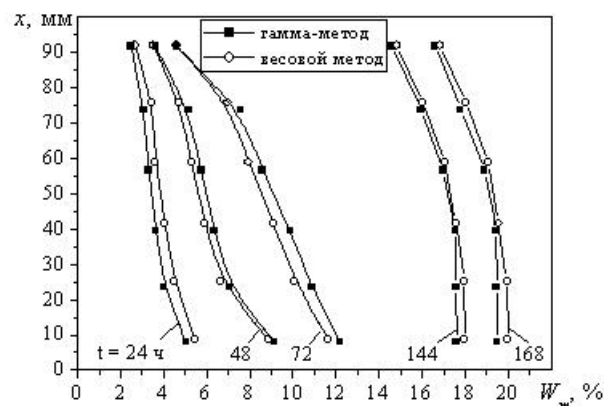


Рис. 4. Распределение влаги в образце газобетона при большом градиенте температуры по высоте образца

Как видно из данного рисунка, при наличии большого градиента температуры увлажнение материала существенно интенсифицируется не только в нижней части образца, как в предыдущем опыте (см. рис. 3.), но и по всей высоте образца.

Более наглядно процесс увлажнения пористого материала при различных граничных тепловлажностных условиях можно проанализировать с помощью рис. 5. На данном рисунке представлены итоговые профили распределения влаги в образце через 168 часов, полученные в различных опытах.

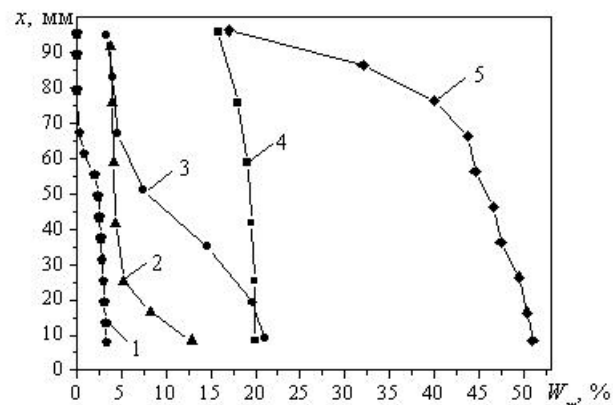


Рис. 5. Распределение влаги в образце газобетона через 168 часов увлажнения при различных тепловлажностных условиях: 1 — при 20 °С без градиента температуры [6]; 2 — при 70 °С без градиента температуры; 3 — при малом градиенте температуры; 4 — при большом градиенте температуры; 5 — через 22 часа капиллярной пропитки при 20 °С [7]

Графики 2, 3 и 4 данного рисунка показывают, что с ростом градиента температуры, происходила интенсификация увлажнения материала. При этом перепад влажности воздуха в камерах во всех экспериментах был примерно одинаковый. Интенсивное увлажнение материала при наличии значительного градиента температуры, очевидно, объясняется тем, что влажный воздух перемещаясь по образцу, встречал на своем пути более холодные слои материала, температура которых, была ниже точки росы. В результате происходила конденсация влаги в порах материала.

Кроме того, на рис. 5 представлены результаты, полученные ранее гамма-методом в аналогичных экспериментах при 20 °С при сорбционном увлажнении [6] и при капиллярной пропитке [7]. Как видно из рисунка, при 20 °С сорбционное увлажнение материала происходило менее интенсивно, чем при 70 °С, что, вероятно, объясняется на порядок меньшим перепадом влажности воздуха в камерах по сравнению с остальными экспериментами. При капиллярной пропитке нижняя поверхность образца касалась поверхности воды, и увлажнение материала происходило значительно интенсивнее по сравнению с остальными экспериментами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного экспериментального исследования были получены данные по увлажнению пористого материала при различных тепло-влажностных условиях.

Полученные экспериментальные данные показывают, что наименее интенсивно процесс увлажнения идет, при отсутствии градиента температуры, когда температура материала поддерживается выше точки росы. В случае наличия градиента температуры в образце, когда температура материала опускается ниже точки росы, процесс увлажнения пористого материала значительно интенсифицируется. Причем, чем больше градиент температуры, тем интенсивнее идет увлажнение материала.

Результаты экспериментов позволяют определить интенсивность увлажнения исследуемого материала в условиях высокой влажности при различной температуре и оценить необходимость разработки мероприятий по предотвращению увлажнения материала в реальных условиях эксплуатации.

Работа выполнялась при поддержке молодежной программы фонда «Глобальная энергия» (научно-исследовательский грант № МГ-2005/04/3) и гранта РФФИ 06-08-81003\_Бел-а и молодежного Лаврентьевского конкурса СО РАН.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$W_m$  — относительная массовая влажность материала, %;

$x$  — высота образца материала, мм;

$T$  — время, ч;

$t$  — температура воздуха, °С;

$f$  — абсолютная влажность воздуха, г/м<sup>3</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павлюкевич Н.В.** Введение в теорию тепло- и массо-переноса в пористых средах. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. 140 с.
2. **Перехоженцев А.Г.** Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолгГАСА, 1997. 273 с.
3. **Тертичник Е. И.** Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колонки // ИФЖ. 1965. Т. 8. № 2. С. 247—250.
4. **Низовцев М.И., Станкус С.В., Стерлягов А.Н., Терехов В.И., Хайрулин Р.А.** Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении // ИФЖ. 2005. Т. 78. № 1. С. 67—73.
5. **Берлинер М. А.** Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.: Энергия, 1965. 488 с.
6. **Низовцев М. И., Станкус С. В., Терехов В. И., Хайрулин Р. А., Стерлягов А. Н.** Экспериментальное определение коэффициента диффузии влаги газобетона гамма-методом // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 4. С. 123—127.
7. **Низовцев М. И., Станкус С. В., Терехов В. И., Хайрулин Р. А., Стерлягов А. Н.** Измерение коэффициента диффузии влаги газобетона гамма-методом при сорбционном увлажнении // Изв. вузов. Строительство. 2003. № 4. С. 116—120.