

## ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЛАГОПЕРЕНОС В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

М.И. Низовцев, А.Н. Стерлягов, В.И. Терехов

*В работе приведены результаты экспериментальных исследований влагопереноса в пористых материалах при различных тепловлажностных условиях. В экспериментах наряду с традиционным методом исследования «разрезной колонки» применялся и бесконтактный метод гамма просвечивания. Определено влияние температурного градиента в пористом материале на интенсивность его увлажнения*

*Ключевые слова: теплоперенос, пористые материалы, градиент температуры*

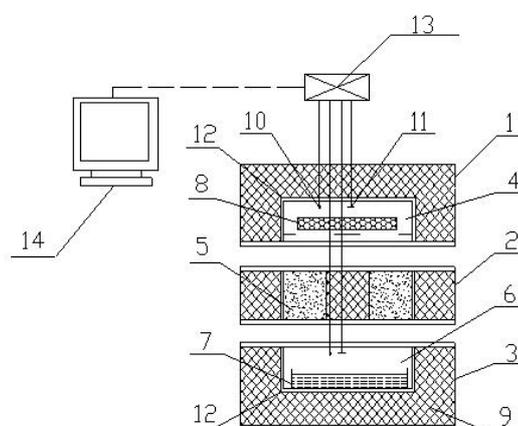
### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства большинства пористых материалов определяются интенсивностью происходящих в них процессов теплопереноса. [1, 2]. В качестве примера можно привести применение в строительстве пористых материалов с высокими теплоизоляционными свойствами. Теплозащитные свойства данных строительных пористых материалов в значительной степени зависят от их тепловлажностного состояния [3].

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. Для моделирования этих процессов необходимы эффективные нестационарные модели расчета теплопереноса. Например, в последнее время для расчетов тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий, активно применяется нестационарная модель тепло- и влагопереноса [4]. В тоже время верификация расчетных моделей требует надежной базы экспериментальных данных. Таким образом, на данный момент весьма актуальны экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса при увлажнении пористых материалов.

### 1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования совместного тепло- и влагопереноса в пористых материалах проводились на специально изготовленной экспериментальной установке, которая позволяла выполнять эксперименты при различных тепло-влажностных условиях. Схема установки представлена на рисунке 1.



*Рисунок 1 - Экспериментальная установка:  
1 – верхний блок; 2 – средний блок; 3 – нижний блок; 4 – верхняя камера; 5 – образец; 6 – нижняя камера; 7 – ёмкость с водой; 8 – сорбент; 9 – теплоизоляция; 10 – термогигрометры; 11 – датчики температуры; 12 – теплообменник; 13 – АЦП; 14 – ПЭВМ*

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 блока подключались термостаты. В результате, с помощью термостатов можно было устанавливать требуемую температуру воздуха в камерах. Определенная влажность воздуха в камерах поддерживалась при помощи емкостей с водой и сорбентами. Таким образом, данная установка позволяла регулировать температуру воздуха в камерах в диапазоне от -

30 до + 80 °С, и влажность воздуха от 0 до 100%.

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 блока установки. В результате, поддерживая в камерах установки определенную температуру и влажность воздуха, на границах образцов создавались требуемые тепло-влажностные условия. В данную установку одновременно помещались несколько образцов исследуемого материала. Описанная 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 тепло-влажностных условий в эксперименте.

## 2 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 применять бесконтактные методы, поскольку они позволяют определять распределение влаги в материале за относительно короткий промежуток времени без его разрушения. Для повышения точности проводимых измерений распределение влаги в образцах определялось параллельно методом разрезной колонки [5] и бесконтактным методом гамма-просвечивания [6].

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 (в данном случае на 6 слоев), которые потом плотно соединялись между собой. По-

сле 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. При исследовании процессов влагопереноса в пористом материале гамма-методом необходимо учитывать, что ослабление гамма – излучения происходит, во – первых, за счет скелета самого материала, а, во – вторых, за счет воды содержащейся в порах материала. Поэтому предварительно перед экспериментом определялось ослабление гамма - излучения в сухом образце. После эксперимента увлажненный образец просвечивался пучком гамма - излучения в различных по высоте сечениях и находилась влажность материала в соответствующих сечениях образца. Таким образом, получали распределение влаги по высоте образца.

## 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве исследуемого пористого материала в экспериментах был выбран автоклавный газобетон плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> и пористостью около 80%. Образцы газобетона имели форму параллелепипеда с поперечным сечением 50×100 мм и высотой 100 мм. Перед экспериментом образцы помещались в вакуумный сушильный шкаф и высушивались до постоянной массы при температуре около 105 °С. Затем, боковые поверхности образцов влагоизолировались, для достижения в эксперименте одномерности процесса влагопереноса. После этого подготовленные образцы помещались в средний блок экспериментальной установки. Во время проведения эксперимента в камерах верхнего и нижнего блока установки поддерживались требуемая температура и влажность воздуха. Началом эксперимента считался момент соединения блоков установки, то есть момент создания на граница образца постоянных тепло-влажностных условий.

Во всех проводимых экспериментах тепло-влажностные условия на нижней границе образца были одинаковыми: поддерживалась температура 70 °С и создавалась 100% относительная влажность воздуха, что соответствовало абсолютной влажности воздуха 200 г/м<sup>3</sup>. На верхней границе образца тепло-влажностные условия были различными в разных экспериментах.

## ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЛАГОПЕРЕНОС В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

На первом этапе был проведен эксперимент по исследованию влагопереноса в материале при отсутствии перепада температуры между воздухом на нижней и верхней границах образца. На верхней границе образца поддерживалась температура  $70^{\circ}\text{C}$  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 температуры точки росы, чтобы исключить конденсацию влаги в образце. Полученное распределение влаги по высоте образца в различные моменты времени с начала процесса влагопереноса представлено на рисунке 2.

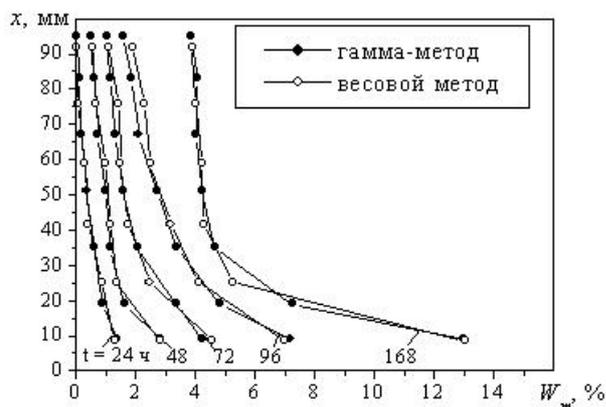


Рисунок 2 - Распределение влаги в образце газобетона при отсутствии градиента температуры по высоте образца

Из данного рисунка следует, что с течением времени происходило изменение распределения влаги в образце, что свидетельствовало 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. Видно, что результаты, полученные разными методами, удовлетворительно согласовались между собой.

В следующем эксперименте температура воздуха на верхней границе образца была снижена до  $65^{\circ}\text{C}$ , при сохранении нулевой влажности воздуха. В результате перепад температуры между воздухом в нижней и в верхней камере составлял  $5^{\circ}\text{C}$ , при этом пе-

репад влажности воздуха остался прежним. Таким образом, по высоте образца был создан небольшой градиент температуры, при этом температура внутри образца понизилась ниже температуры точки росы. Результаты эксперимента при данных тепловлажностных условиях представлены на рисунке 3.

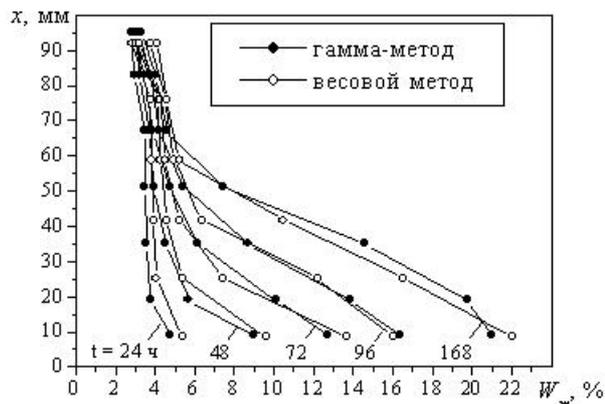


Рисунок 3 - Распределение влаги в образце газобетона при малом градиенте температуры по высоте образца

Из данного рисунка видно, что при наличии небольшого градиента температуры увлажнение материала на нижней границе образца происходило более интенсивно, чем в первом эксперименте (см. рисунок 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 температур между температурой воздуха в нижней и верхней камере. С этой целью температура воздуха на верхней границе образца была снижена до  $20^{\circ}\text{C}$ . При этом абсолютная влажность воздуха в верхней камере в течение всего эксперимента поддерживалась равной  $10\text{ г/м}^3$ . В результате перепад температуры между воздухом в нижней и в верхней камере составлял  $50^{\circ}\text{C}$ , 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 температуры точки росы, что могло привести к конденсации влаги внутри образца. Результаты эксперимента по увлажнению пористого материала при значи-

тельном градиенте температуры представлены на рисунке 4.

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

Наглядно сравнить интенсивность процесса увлажнения пористого материала при различных граничных тепло-влажностных условиях можно на рисунке 5.

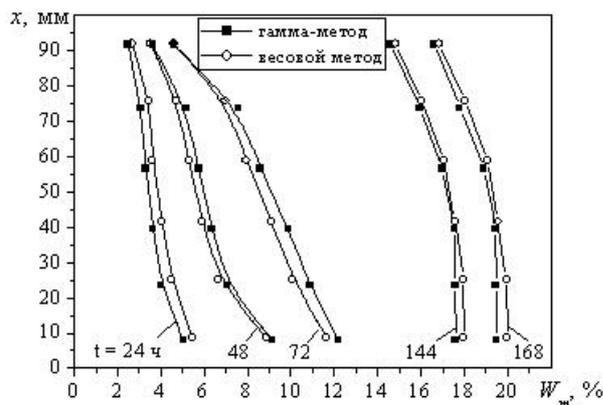


Рисунок 4 - Распределение влаги в образце газобетона при большом градиенте температуры по высоте образца

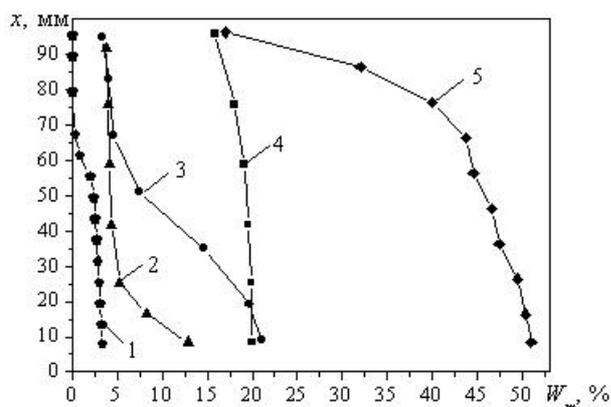


Рисунок 5 - Распределение влаги в образце газобетона через 168 часа увлажнения при различных тепловлажностных условиях: 1 – при 20 °С без градиента температуры [6]; 2 – при 70 °С без градиента температуры; 3 – при малом градиенте температуры; 4 – при большом градиенте температуры; 5 – через 22 часа капиллярной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

На данном рисунке представлены профили распределения влаги в образцах через 168 часов, полученные при различных режимах увлажнения. Графики 2, 3 и 4 данного рисунка показывают, что с ростом градиента

температуры, происходила интенсификация увлажнения материала. При этом перепад влажности воздуха в камерах в этих экспериментах был одинаковым. 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 температуры точки росы. В результате происходила конденсация влаги в порах материала.

Кроме того, на рисунке 5 представлены результаты, полученные ранее гамма - методом в аналогичных экспериментах при 20 °С при сорбционном увлажнении [6] и при капиллярной пропитке [6]. 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 сорбционным увлажнением.

#### 4 РАСЧЕТЫ ВЛАГОПЕРЕНОСА

Полученные экспериментальные данные по увлажнению пористого материала были использованы для верификации расчетной модели сопряженного тепло-влажностного переноса в ограждающих конструкциях зданий [4]. В применяемой для расчетов модели в качестве потенциалов переноса используется температура и относительная влажность.

На основании рассматриваемой модели были выполнены расчеты влагопереноса при сорбционном увлажнении газобетона без градиента температуры при 20 °С. В данном случае нижняя грань образца находилась при 100% относительной влажности, а верхняя при нулевой влажности воздуха. Сопоставленные результаты расчетов и экспериментальные данные представлены на рисунке 6. Из представленных на рисунке 6 данных, следует, что расчеты удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

Также были выполнены расчеты сорбционного увлажнения газобетона при малом градиенте температуры в условиях соответствующим второму эксперименту данной статьи. При этом рассматривалось два случая: верхние грани образца влагоизолированы и невлагоизолированы [7].

Как видно из рисунка 7, выполненные расчеты удовлетворительно описывали экс-

периментальные результаты и показывали, как и эксперимент, более значительное накопление влаги в образце с влагоизолированной верхней гранью.

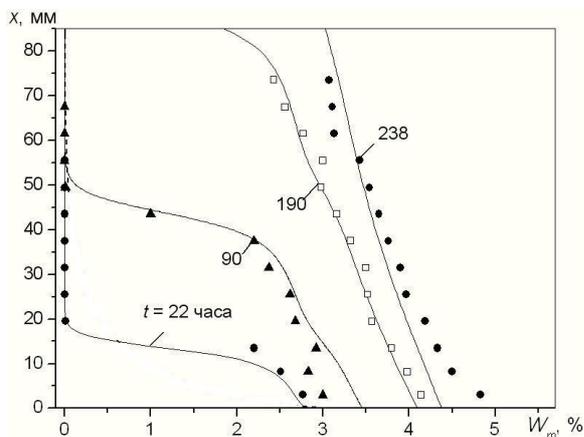


Рисунок 6 - Результаты расчетов и экспериментов при сорбционном увлажнении газобетона без градиента температуры

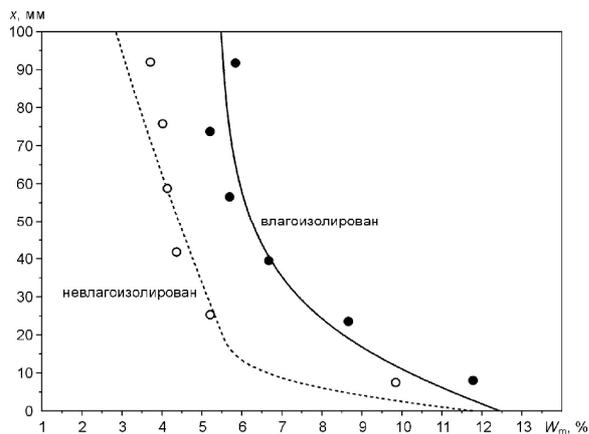


Рисунок 7 - Результаты расчетов и экспериментальные данные по увлажнению газобетона при малом градиенте температуры

#### 4 ВЫВОДЫ

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 температуры точки росы. При наличии градиента температуры в образце, когда температура материала опускается ниже температуры точки росы, про-

цесс увлажнения пористого материала значительно интенсифицируется, причем, чем больше градиент температуры, тем интенсивнее идет увлажнение материала.

С использованием экспериментальных данных выполнена верификация модели расчета тепло- и влагопереноса в пористых материалах. Результаты экспериментов и расчетов позволяют определить интенсивность увлажнения исследуемого материала при различных тепло-влажностных условиях и оценить необходимость разработки мероприятий по предотвращению увлажнению материала в зависимости от условий эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлюкевич, Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах. - Минск: Ин-т тепло- и массообмена НАНБ, 2002. - 140 с.
2. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. - 364 с.
3. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. - М.: Стройиздат, 1933. - 189 с.
4. Kunzel, H.M. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components / H.M. Kunzel and K. Kiessl // Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1997. Vol. 40, No 1, PP. 159-167.
5. Тертичник, Е.И. Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колонки // ИФЖ. 1965. Т. 8. № 2. С. 247 - 250.
6. Nizovtsev, M.I. Determination of moisture diffusivity in porous building materials using gamma-method / M.I. Nizovtsev, S.V. Stankus, A.N. Sterlyagov, V.I. Terekhov, R.A. Khairullin // Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, Vol. 51, Issues 17-18, P. 161-4167.
7. Nizovtsev, M.I. Effect of material humidity on heat and moisture-transfer processes in gas-concrete / M.I. Nizovtsev, A.N. Sterlyagov, V.I. Terekhov // In: J.T. Sentowski (Eds), Concrete materials: properties, performance and applications, Nova Science Publishers, New York, 2009, pp. 397-429.

*Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта Сибирского отделения РАН №98.*

**Низовцев М.И.**, д.т.н., зав. лабораторией,  
**Стерлягов А.Н.**, к.т.н., с.н.с.,  
**Терехов В.И.**, д.т.н., зав. лабораторией.  
 Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск,  
 тел. (8383)3165336, e-mail: [terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru)