

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

С применением метода ИК-термографии проведено изучение теплового эффекта при попадании капли воды на поверхность пористого материала в различных тепловлажностных условиях. Получены экспериментальные данные по движению теплового фронта в пористой среде при капиллярной пропитке, а также представлены некоторые результаты экспериментального исследования движения фронта влажности в пористом материале.

Ключевые слова: теплоперенос, пористые материалы, тепловой эффект.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пористые материалы активно применяются во многих областях науки и техники, а процессы тепло- и массообмена в пористых материалах лежат в основе самых различных промышленных технологий. Например, пористые материалы используются в различных энергетических установках, теплообменниках, аппаратах, тепловых насосах и т.д. [1-3]. Эксплуатационные свойства пористых материалов в значительной степени зависят от их влажности и температуры, таким образом, интенсивность процессов тепло- и массопереноса в пористых материалах во многом определяет эффективность работы различных энергетических установок.

Настоящая работа посвящена актуальной научной проблеме исследования процессов взаимосвязанного тепло- и массопереноса в пористых средах. Данная проблема представляет одно из сложных и важных фундаментальных направлений современной науки и имеет значительное прикладное значение. Результаты исследований теплообмена в пористых материалах могут быть использованы для интенсификации теплообмена в различных энергетических установках с целью повышения их энергоэффективности. Для моделирования этих процессов необходимы простые и эффективные модели расчета процессов тепло- и массопереноса в пористых средах, верификация которых требует обширной базы экспериментальных данных. Следовательно, необходимо проведение комплекса экспериментальных и расчетных исследований совместного тепло- и массопереноса в пористых средах с использованием современных физических методов и моделей.

Для экспериментального исследования процессов тепло- и массообмена широкие возможности открывают современные бесконтактные методы исследования [4, 5]. Достоинством этих методов является то, что они позволяют получать данные о теплообменных процессах достаточно оперативно и без разрушения объекта исследования, тем самым, исключая погрешности, вызванные нарушением структуры материала.

1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из эффективных бесконтактных методов исследования теплообмена на поверхности материала является метод ИК-термографии [6, 7]. Данный метод применялся в представленной работе для исследования теплообмена при увлажнении пористых материалов. В экспериментах использовалась тепловизионная камера Nec TH 7102WV, которая давала распределение температуры на поверхности материала при комнатной температуре с чувствительностью 0,1 °С. В исследованиях теплообмена на поверхностях объектов малого размера (капли воды имели размер около 3 мм) на тепловизионную камеру устанавливался дополнительный объектив, позволявший получать распределение температуры на поверхности с пространственным разрешением 0,1 мм.

С помощью данной тепловизионной камеры проводились работы по экспериментальному исследованию теплообмена в пористых материалах при различных тепловлажностных условиях. Рассматривались два случая: теплообмен при попадании капли воды на поверхность пористого материала и теплообмен при капиллярной пропитке материала. Для увлажнения во всех экспериментах использовалась дистиллированная вода комнатной температуры ($t = 21,5$ °С).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Теплообмен при попадании капли воды на поверхность пористого материала

При попадании капли воды на поверхность пористого материала происходит комплекс сложных физических явлений: процесс испарения, сопровождающийся поглощением тепла, а также процесс сорбции, которые наоборот протекают с выделением тепла. Эксперименты по исследованию теплообмена при попадании капли воды на поверхность пористого материала проводились методом ИК-термографии. В качестве исследуемого пористого материала использовался газобетон плотностью 600 кг/м^3 и пористостью около 80%. Эксперименты выполнялись при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха ($t = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 30\%$). Эксперимент заключался в том, что капля воды помещалась на поверхность материала, и с помощью тепловизионной камеры фиксировалась изменение теплового поля поверхности с течением времени. При этом температура капли была такой же, как температура поверхности материала ($t = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Рассмотрим тепловую картину, полученную через 5 секунд после попадания капли воды на поверхность пористого материала с начальной эксплуатационной сорбционной влажностью $W_m = 4\%$. (рисунок 1).

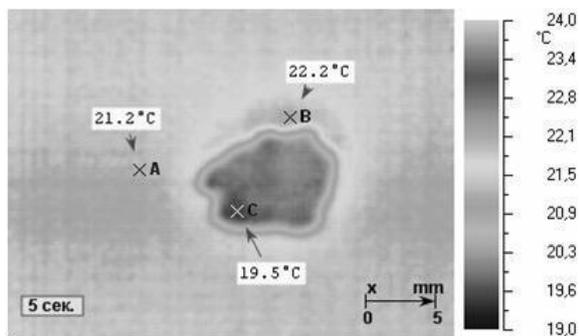


Рисунок 1 - Термограмма поверхности влажного пористого материала через 5 секунд после попадания капли воды

Как следует из рисунка, температура в центральной области попадания капли ниже температуры поверхности материала, что обусловлено процессами испарения. Размер области с пониженной температурой составлял около 8 мм. Между областью с пониженной температурой и остальной поверхностью материала наблюдалась узкая зона повышения температуры примерно на $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Наличие этой зоны связано с тепловым эффектом от

процесса сорбции, который сопровождался выделением тепла.

В последующем эксперименте капля воды попадала на поверхность сухого пористого материала $W_m = 0\%$. (рисунок 2).

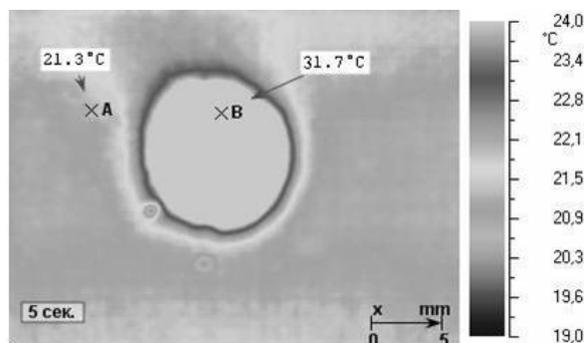


Рисунок 2 - Термограмма поверхности сухого пористого материала через 5 секунд после попадания капли воды

Представленная на рисунке 2 термограмма показывает, что через 5 секунд после попадания капли на поверхность сухого пористого материала происходило существенное повышение температуры (более чем на $10 \text{ }^\circ\text{C}$) в месте попадания капли. Таким образом, в эксперименте с сухим материалом, в отличие от эксперимента с влажным материалом, в первый момент наблюдалось не понижение температуры в области попадания капли, а ее повышение. Вероятно, это объясняется тем, что в случае с сухим материалом в месте контакта капли и материала в первый момент процесс сорбции превалирует над процессом испарения и оказывает основное влияние на теплообмен. Проявляющийся при этом значительный тепловой эффект обусловлен тем, что в сухом материале процесс сорбции протекает с большей интенсивностью и соответственно с большим выделением тепла, чем во влажном материале.

Таким образом, в пористых материалах влажность материала может оказывать существенное влияние на интенсивность процессов теплообмена.

2.2. Теплообмен при капиллярной пропитке пористого материала

Были выполнены экспериментальные исследования тепловых процессов, сопровождающих капиллярную пропитку пористого материала. Эксперименты проводились при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха ($t_n = 26,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 30\%$). Начальная температура образца и воды были равны $t_n = 26,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Из газобетона были изготовлены образцы размерами $10 \times 100 \times 100 \text{ мм}$.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Образцы высушивались до постоянной массы, после этого боковые поверхности образцов влагоизолировались. Эксперименты по капиллярной пропитке проводились следующим образом: нижняя поверхность образца соприкасалась с поверхностью воды, а верхняя поверхность образца контактировала с окружающим воздухом. Таким образом, в образце проходил процесс влагопереноса снизу вверх. Началом эксперимента считался момент соприкосновения нижней поверхности образца с поверхностью воды. Во время проведения эксперимента с интервалом 5 секунд тепловизионной камерой фиксировались термограммы боковой поверхности образца. В качестве примера на рисунке 3 представлена характерная для этого эксперимента термограмма боковой поверхности образца материала через 1 минуту после начала капиллярной пропитки.

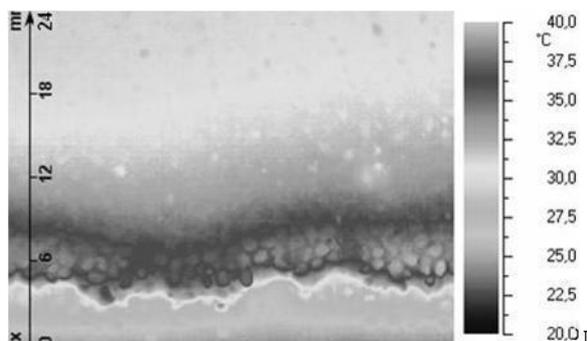


Рисунок 3 - Термограмма боковой поверхности образца пористого материала через 1 минуту после начала пропитки

Представленная на рисунке 3 термограмма показывает температурное поле боковой поверхности от нижней границы образца до высоты 24 мм через 1 минуту после начала пропитки. В нижней части образца наблюдалась область пониженных температур (до 20 °C), на высоте около 5 мм от низа образца по всей ширине происходило резкое повышение температуры почти до 40 °C, а затем постепенное понижение. Таким образом, несмотря на то, что условия проведения эксперимента были изотермические ($t_n = 26,5$ °C), распределение температуры при пропитке по высоте образца оказалось неравномерное.

На основании полученных в эксперименте термограмм были определены профили распределения температуры по высоте образца в различные моменты времени с начала пропитки (рисунок 4).

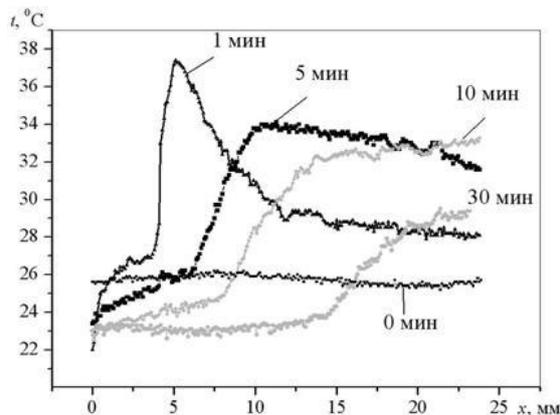


Рисунок 4 - Распределение температуры по высоте образца пористого материала в различные моменты времени

Как видно из рисунка, при капиллярной пропитке сухого пористого материала с течением времени происходило изменение распределения температуры по высоте образца. Рассмотрим профиль температуры через 1 минуту после начала увлажнения. Из рисунка следует, что в нижней части образца с течением времени наблюдалось понижение температуры по сравнению с начальным значением ($t_n = 26,5$ °C). Это объясняется тем, что в данной области образца протекает процесс испарения, который сопровождается поглощением тепла. На высоте около 5 мм наблюдалось резкое повышение температур до 38 °C. Это вероятно связано с тем, что в данном сечении происходило интенсивное сорбционное увлажнение материала, которое сопровождалось выделением тепла. С увеличением высоты образца его температура постепенно снижалась.

Из профилей температуры, представленных на рисунке 4, видно, что с течением времени максимальное значение температуры образца снижалось, и сечение с максимальной температурой перемещалось по направлению к верху образца. Таким образом, при капиллярной пропитке вода по порам материала поднимается вверх, при этом перед фронтом жидкой влагой движется водяной пар, который сорбируется стенками пор, что приводит к выделению тепла. В соответствии с этим, перед фронтом капиллярной влаги движется фронт сорбции, сопровождаемый тепловым фронтом. Наличие теплового фронта при сорбции пористых материалов ранее отмечалось в ряде работ [8, 9]. Однако это явление при капиллярной пропитке пористых материалов ранее не исследовались.

С помощью полученных в экспериментах термограмм было определено изменение

температуры в различных сечениях образца с течением времени.

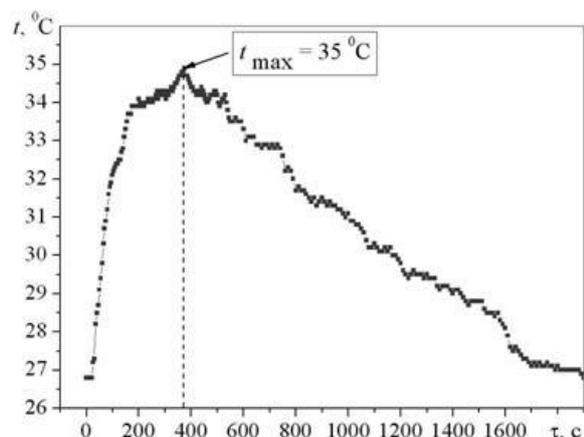


Рисунок 5 - Изменение температуры в сечении 20 мм от низа образца с течением времени

На рисунке 5 представлены данные изменению температуры поверхности материала с течением времени в сечении 20 мм от низа образца. Результаты, представленные на рисунке, показывают, что температура в сечении 20 мм от низа образца начинала резко увеличиваться уже через несколько секунд после начала эксперимента, а примерно через 400 секунд температура достигала своего максимального значения ($t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$). Затем наблюдалось плавное падение температуры до начальной температуры образца ($t_{н} = 26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Таким образом, из представленных данных следует, что максимальное выделение тепла в сечении 20 мм происходило примерно через 400 секунд с начала эксперимента. То есть, можно предположить, что фронт капиллярной влаги был близок к сечению 20 мм через 400 секунд после начала пропитки.

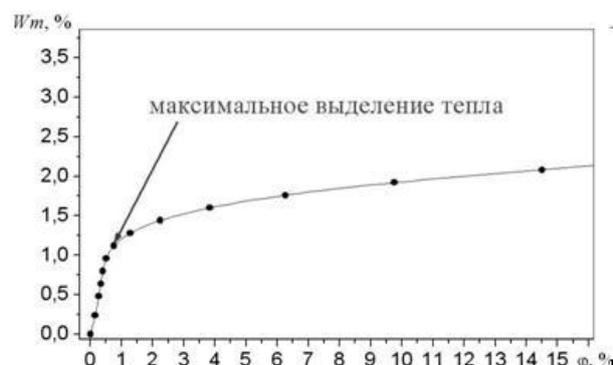


Рисунок 6 - Изотерма сорбции для пористого газобетона плотностью 600 кг/м^3 при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ранее в работе [10] для исследуемого пористого материала была получена изотерма сорбции, которая представляет собой зависимость массовой влажности материала от относительной влажности воздуха при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 6 показан фрагмент полученной изотермы сорбции. На представленной изотерме сорбции можно выделить начальный участок резкого повышения влажности материала до значений $1\pm 1,5\%$, характерный для мономолекулярной адсорбции. Согласно [9, 11] при мономолекулярной адсорбции поглощение влаги сопровождается наиболее интенсивным выделением тепла в материале. При дальнейшем увлажнении наступает стадия полимолекулярной адсорбции при которой интенсивность тепловыделений существенно снижается. Таким образом, для рассматриваемого пористого материала наибольшее выделение тепла вследствие процессов сорбции следует ожидать при влажности материала $1\pm 1,5\%$.

В экспериментах по капиллярной пропитке [12] с использованием метода гамма-просвечивания были получены профили влажности материала в различных сечениях образца с течением времени (рисунок 7).

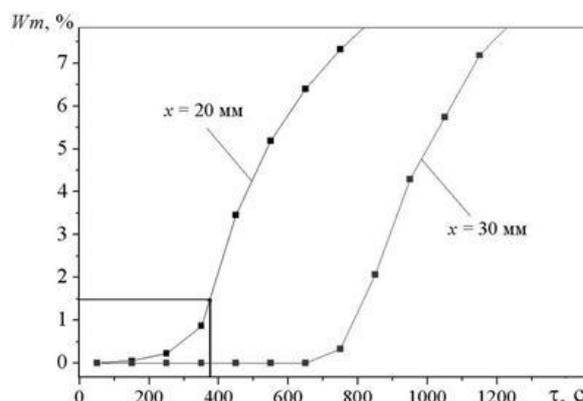


Рисунок 7 - Изменение влажности материала при капиллярной пропитке в различных сечениях образца с течением времени

Из данных представленных на рисунке следует, что в сечении 20 мм влажность материала достигала $1,5\%$ примерно через 400 секунд после начала эксперимента. Таким образом, в соответствии с изотермой сорбции в данном сечении в этот момент времени должно происходить интенсивное выделение тепла вследствие процессов мономолекулярной сорбции. Это подтверждает то, что обнаруженный в экспериментах по капиллярной пропитке тепловой фронт связан с процессами сорбции влаги в материале.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ФРОНТА ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таким образом, экспериментально показано, что при капиллярной пропитке сухого пористого материала перед фронтом капиллярной влаги движется тепловой фронт, связанный с сорбцией.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных экспериментальных исследований бесконтактным методом ИК-термографии были получены новые данные по тепловым процессам в пористых материалах при их увлажнении различными способами. На основании полученных экспериментальных данных при попадании капель воды на поверхность пористого материала был обнаружен существенный тепловой эффект, который зависел от влажности материала и был обусловлен процессами сорбции. Выполненные эксперименты показали, что при капиллярной пропитке сухого пористого материала перед фронтом капиллярной влаги движется тепловой фронт, связанный с сорбционными процессами.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

W_m - относительная массовая влажность материала, %;

x - высота образца материала, мм;

t - температура, °С;

φ - относительная влажность воздуха, %;

τ - время, с.

Индексы:

n - начальная;

m - массовая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. – 364 с.

2. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах // Казань: Центр информационных технологий, 2007. - 240 с.

3. Павлюкевич Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах. - Минск: Ин-т тепло- и массообмена НАНБ, 2002. – 140 с.

4. Аристов Ю.И., Бухавцева Н.Н., Верниковская Н.В. и др. Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / Под ред. Пармона В.Н. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 300 с.

5. Titman D.J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures // NDT & E International, 2001. Volume 34. Issue 2. P. 149-154.

6. Bendada A., Zheng C., Nardini N. Investigation of temperature control parameters for inductively heated semi-solid light alloys using infrared imaging and inverse heat conduction // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Volume 37. P. 37-44.

7. Vainer B.G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Volume 41. P. 65-77.

8. Боресков Г.К. Матрос Ю.Ш., Киселев О.В. Осуществление каталитических процессов в нестационарных условиях: 1. Тепловой фронт в слое катализатора // Кинетика и катализ. - 1979. - Т.20. № 3. - С. 773-780.

9. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 414 с.

10. Низовцев М.И., Станкус С.В., Стерлягов А.Н., Терехов В.И., Хайруллин Р.А. Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении // ИФЖ.- 2005. Т. 78, № 1.- С. 67-73.

11. Ефимов С.С. Влага гигроскопичных материалов. - Новосибирск: Изд-во «Наука» СО РАН, 1986. - 215 с.

12. Nizovtsev M.I., Stankus S.V., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I., Khairullin R.A. Determination of moisture diffusivity in porous building materials using gamma- method // Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, Vol. 51, Issues 17-18, P. 4161-4167.

Низовцев М.И., к.т.н., с.н.с.,

Стерлягов А.Н.,

Терехов В.И., д.т.н., проф.,

Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе

СО РАН, Новосибирск,

тел. (8383)3306736, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru