УДК 532.685, 536.658

ДВИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ФРОНТА ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ПОРИСТЫХ СРЕД

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ 10-08-90008_Бел-а.

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования процессов теплообмена в пористых средах. С применением метода ИК-термографии проведено изучение движения теплового фронта при капиллярном увлажнении пористого материала. Сопоставлены экспериментальные данные по движению теплового фронта в пористой среде при капиллярной пропитке с ранее полученными результатами экспериментального исследования движения фронта влажности в пористом материале при капиллярной пропитке.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пористые среды 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, тепломассообменных 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. Результаты исследований тепломассопереноса 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 тепломассообменных процессах достаточно оперативно и без разрушения объекта исследования, тем самым, исключая погрешности, вызванные нарушением структуры материала.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из эффективных бесконтактных методов исследования теплообмена на поверхности материала является метод ИК-термографии [6, 7]. Этот метод применялся в представленной работе для исследования теплообмена при увлажнении пористых материалов. В экспериментах использовалась тепловизионная камера Nec TH 7102WV, которая позволяла получать распределение температуры на поверхности материала при комнатной температуре с чувствительностью 0,1 °С. С помощью данной тепловизионной камеры проводились работы по экспериментальному исследованию теплообмена в пористых материалах при различных тепловлажностных условиях. Рассматривались процессы теплообмена на поверхности пористого материала при капиллярной пропитке материала.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

При увлажнении пористого материала происходит комплекс сложных физических явлений: процесс испарения, сопровождающийся поглощением тепла, а также процесс сорбции, который наоборот протекает с выделением тепла. Исследование теплообмена при капиллярном увлажнении пористого материала проводилось методом ИК-термографии. В качестве исследуемого пористого материала использовался газобетон плотностью 600 кг/м^3 и пористостью около 80%. Эксперименты проводились при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха (tн = 26,5 °С, φ = 30%). Начальная температура образца и воды были равны tн =26,5 °С. Из газобетона были изготовлены образцы размерами 10×100×100 мм. Образцы высушивались до постоянной массы, после этого боковые поверхности образцов изолировались.

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 верх. 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 рис.1 представлена характерная для этого эксперимента термограмма боковой поверхности образца материала через 1 минуту после начала капиллярной пропитки.

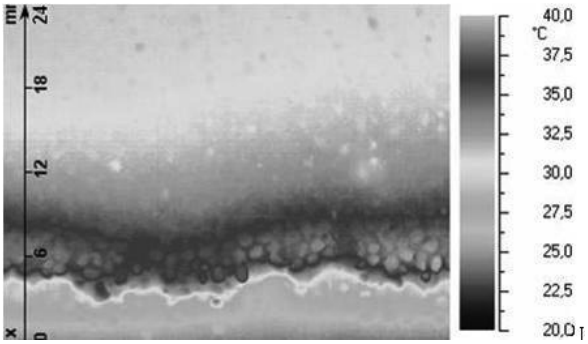

Рис.1 Термограмма боковой поверхности образца пористого материала через 1 минуту после начала пропитки

Представленная на рис.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 °С), на высоте около 5 мм от низа образца по всей ширине образца происходило резкое повышение температуры почти до 40 °С. Наличие данной области повышенных температур связано с тепловым эффектом от процесса сорбции, который сопровождался выделением тепла. Таким образом, несмотря на то, что условия проведения эксперимента были изотермические, распределение температуры по высоте образца неравномерное.

На основании полученных в эксперименте термограмм были определены профили распределения температуры по высоте образца в различные моменты времени с начала пропитки (рис.2). 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 4 видно, что в нижней части образца с течением времени наблюдалось понижение температуры по сравнению с начальным значением (tн = 26,5 °С). 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 °С. 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.

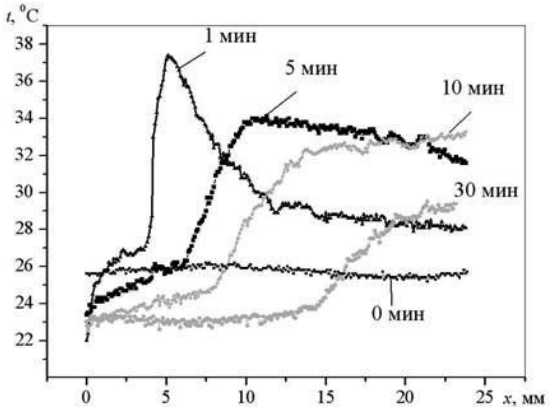

Рис.2 Распределение температуры по высоте образца пористого материала в различные моменты времени

Из профилей температуры, представленных на рис.2 видно, что с течением времени максимальное значение температуры образца снижалось, и сечение с максимальной температурой перемещалось по направлению к верху образца. Таким образом, можно сделать вывод, что при капиллярной пропитке перед фронтом жидкой влаги по порам 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.

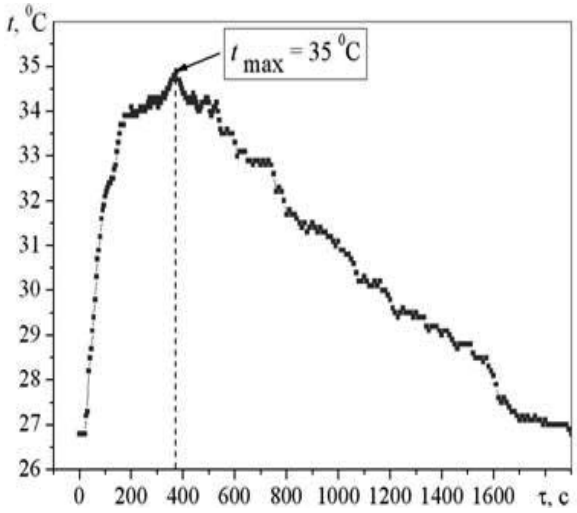

Рис.3 Изменениетемпературывсечении 20мм от низа образца пористого материала с течением времени

На рис.3 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°C). Затем наблюдалось плавное падение температуры до начальной температуры образца. 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.

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 °C. На рис.4 показан фрагмент полученной изотермы сорбции. На представленной изотерме сорбции можно выделить начальный участок резкого повышения влажности материала до значений 1÷1,5%, характерный для мономолекулярной адсорбции.

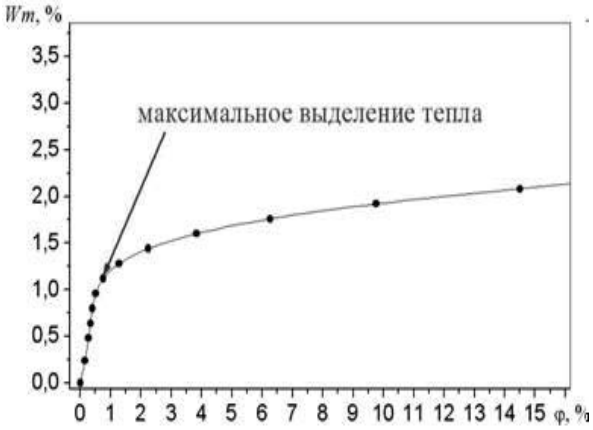

Рис.4 Изотерма сорбции для газобетона плотностью 600 кг/м^3 при 20 °C

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÷1,5%.

Ранее в экспериментах по капиллярной пропитке [12] с использованием метода гамма-просвечивания были получены профили влажности материала в различных сечениях с течением времени (рис.5).

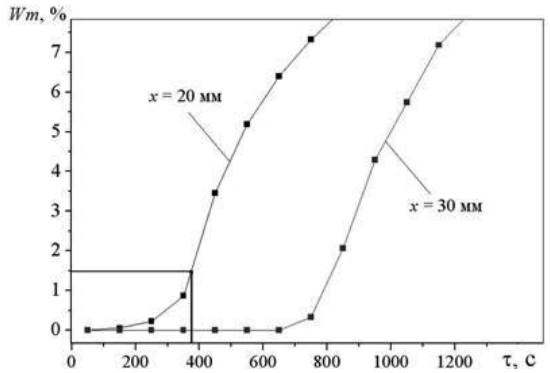

Рис.5 Изменение влажности материала при капиллярной пропитке в различных сечениях образца с течением времени

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.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных экспериментальных исследований бесконтактным методом ИК-термографии были получены новые данные по тепловым процессам в пористом материале при капиллярном увлажнении. На основании полученных экспериментальных данных был обнаружен существенный тепловой эффект, обусловленный процессами сорбции. Таким образом, экспериментально показано, что в пористых материалах влажность материала может оказывать существенное влияние на интенсивность процессов теплообмена Выполненные эксперименты показали, что при капиллярной пропитке сухого пористого материала перед фронтом капиллярной влаги движется тепловой фронт, связанный с тепловыделениями сопутсвующим процессам сорбции.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Wm — относительная массовая влажность, %;
x — высота образца материала, мм;
t — температура, 0С;
φ — относительная влажность воздуха, %;
τ — время, с.

ИНДЕКСЫ:
н — начальная;
m — массовая.

ЛИТЕРАТУРА

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. N 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., Хайрулин 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» СОРАН, 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