

Исследование процесса массопереноса в пористом материале при пропитке и сушке

А.В. Федоров, А.А. Жилин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
e-mail: fedorov@itam.nsc.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования процессов капиллярной пропитки и сушки пористого материала (силикагеля). Рассмотрены два способа его увлажнения. Проведено их сопоставление, проанализировано влияние скорости пропитки на геометрию зерен силикагеля. Выполнена сушка зерен силикагеля: микроволновым, конвективным и акусто-конвективным способами. Показана зависимость скорости и качества осушаемого материала от выбранного способа сушки. Для описания полученных экспериментальных данных предложена математическая модель диффузии влаги в пористом теле. Численно получено распределение влажности в цилиндрических образцах, состоящих из зерен силикагеля, для различных значений начальной влажности, с учетом акусто-конвективного воздействия.

Введение. Применение пористых материалов нового поколения с развитыми поверхностными и внутренними структурами в химической, строительной и ряде других отраслей промышленности приводит к необходимости исследования особенностей механизма взаимодействия влаги с данным классом материалов. В настоящей работе в качестве исследуемого материала выбран технический гранулированный мелкопористый силикагель марки КСМГ.

Ранее в [1] было показано, что на сушку силикагеля существенное влияние оказывает скорость осушающего потока воздуха. В данной работе исследовано влияние частоты акустических колебаний и начальной влажности силикагеля на динамику сушки. Скорости процесса миграции влаги в пористом скелете твердого материала исследовались как при его пропитке, так и при сушке. Основной задачей при этом являлось изучение влияния способа пропитки и сушки на структуру и целостность материала, а также определение коэффициентов диффузии и влагоотдачи для цилиндрического образца, состоящего из зерен силикагеля.

Определение начальной влажности силикагеля. Перед проведением экспериментов по увлажнению и сушке необходимо было определить начальную влажность зернистого силикагеля. Для этого выполнялась сушка двух контрольных порций силикагеля. Начальная масса первой порции составляла – 92.13 г, второй – 74.28 г. Сушка осуществлялась микроволновым способом, для чего использовалась бытовая микроволновая печь Samsung M1712NR с номинальной выходной мощностью 800 Вт. Порции силикагеля помещались в прозрачные для микроволновых лучей чашки. Масса первой чашки – 303.5 г, второй – 229.22 г.

На рис. 1 отражена кинетика сушки испытуемых порций силикагеля в микроволновой печи. Результаты измерений первой порции представлены треугольниками, второй – ромбами. Как видно из рис. 1, кинетика сушки имеет три режима.

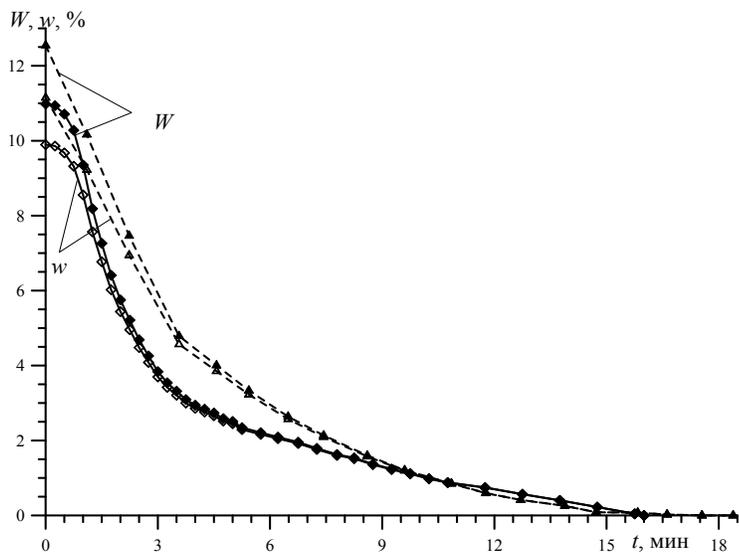


Рис. 1. Кинетика сушки силикагеля микроволнами

Первый режим реализуется в начальные моменты времени продолжительностью до одной минуты и характеризуется достаточно медленным влаговыделением. На данном этапе влага испаряется только с поверхности зерен силикагеля. Параллельно с этим процессом происходит внутренний прогрев зерен силикагеля. Таким образом, медленное влаговыделение связано с инерционностью влагопереноса внутри частицы и переходом жидкости, сорбированной на внутренней поверхности, в сво-

бодное состояние (состояние пара в том числе).

Второй режим реализуется до середины третьей минуты и характеризуется почти линейной скоростью влаговыделения. На данном этапе происходит интенсивное влаговыделение с максимальной скоростью. Этот процесс поддерживается благодаря испаренной/свободной влаге, находящейся и возникающей внутри зерен силикагеля.

Третий режим реализуется через три с половиной минуты после начала процесса сушки и характеризуется замедлением влаговыделения по сравнению со вторым режимом. Замедление вызвано изменением механизма влаговыделения, т.е. завершением выхода испаренной влаги из зерен силикагеля и началом выделения связанной влаги.

Анализируя поведение кривых на рис. 1, отображающих изменение абсолютной и относительной влажности, можно видеть, что после 16 минут сушки масса контрольной порции силикагеля перестает изменяться. Величины абсолютной и относительной влажности силикагеля с уменьшением влажности начинают сближаться, и при достижении значения абсолютно сухого вещества становятся равными. Таким образом, нами была получена масса абсолютно сухого силикагеля, которая в дальнейших исследованиях принималась как стартовая для определения влажности. Оставшиеся части силикагеля, из которых были взяты контрольные порции, плотно упаковывались, чтобы исключить контакт с влагой из окружающего воздуха. При проведении дальнейших экспериментов считалось, что у силикагеля первой серии начальная абсолютная влажность составляет 12.5 %, относительная – 11.1 %; для второй серии – 11 % и 10 % соответственно.

Отметим, что в процессе сушки силикагеля микроволновым способом в материале возникают трещины, которые увеличиваются в размерах и приводят к разрушению зерен на мелкие части.

Увлажнение силикагеля. При подготовке силикагеля к экспериментам по сушке его необходимо увлажнить, для чего применялось два способа увлажнения. Цель – определение максимально быстрого способа подготовки материала для экспериментов по экстракции влаги на акусто-конвективной сушильной установке при условии сохранения удовлетворительного качества зерен силикагеля. Поскольку для последующих исследований использовались только целые зерна, то перед увлажнением материал проверялся на целостность, т.е. отсутствие трещин и сколов. В начале исследования каждая порция силикагеля помещалась в пластмассовый пакет из сетчатого материала с квадратными отверстиями (размером 2×2 мм), одна из сторон пакета была снабжена застежкой на молнии для загрузки и выгрузки исследуемого материала.

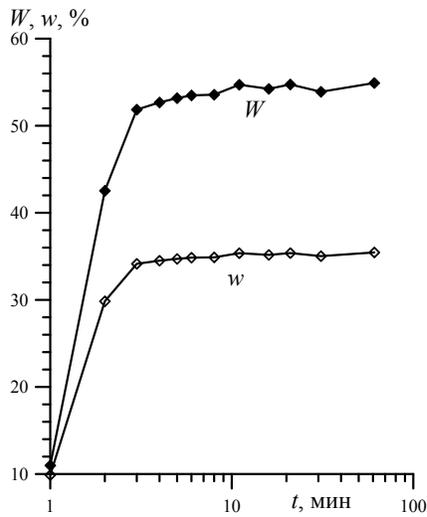


Рис. 2. Кинетика пропитки силикагеля водой.

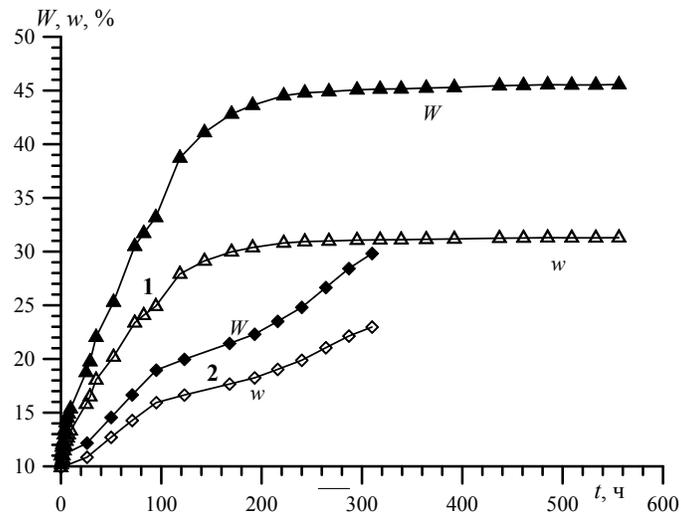


Рис. 3. Кинетика сорбционного увлажнения силикагеля.

Первый способ – пропитка. Предварительно отобранные зерна силикагеля помещались в пластиковый пакет массой 9.78 г. Масса загруженной порции зернистого силикагеля составила 76.85 г. Подготовленная порция силикагеля погружалась в ванночку с водой при комнатной температуре. После погружения зерен силикагеля в воду наблюдался контакт жидкости с развитыми внешними и внутренними пористыми поверхностями зерен силикагеля. При этом отмечалось интенсивное поглощение влаги зернами, сопровождающееся шипящим звуком. На рис. 2 показана динамика изменения абсолютной и относительной влажности при погружении исследуемого материала в воду. Для удобства восприятия ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе, а начало отсчета смещено на величину $t_0 = 1$ мин (рис. 2).

При данном способе пропитки в зернах силикагеля, имеющих эллипсоидальную форму, появляются микротрещины, достаточно быстро растущие, и в итоге приводящие к разрушению зерна. Как видно из рис. 2, силикагель за первые две минуты практически полностью увлажнился, поглотив основную массу воды. К десятой минуте эксперимента пропитка практически завершилась, поскольку влажность достигла своего максимального значения. Последующее увлажнение в течение 50 минут это подтвердило, так как изменение влажности не превысило 0.2 %. Таким образом, данный способ увлажнения представляется весьма интересным, однако его недостатком является разрушение зерен на серию осколков. Отметим, что размеры некоторых осколков меньше размеров отверстий сетчатого материала (< 2 мм), и поэтому они выпадают из контрольного пакета, чем и объясняется небольшое колебание значений влажности в интервале $t > 10$ мин. На основании вышесказанного можно заключить, что данный способ увлажнения не может быть применен для подготовки исследуемого материала.

Второй способ – сорбция: основан на сорбционном увлажнении зерен силикагеля водяными парами. Над ванночкой, наполненной водой комнатной температуры, устанавливалась емкость, в которую помещался стакан с зернами силикагеля. Конструкция помещалась в плотный влагонепроницаемый пакет. Температура в помещении рядом с ванночкой составляла 23.5°C, влажность воздуха – 22%, температура точки росы – 0.7°C. Внутри пакета размещался датчик контроля температуры и влажности testo 635. Температура внутри закрытого пакета соответствовала температуре окружающего воздуха. Влажность в процессе проведения эксперимента незначительно колебалась около значения 90 %, при этом температура точки росы составляла 22 °C. Данные по замерам массы и расчетные значения по изменению абсолютной и относительной влажности двух ко-

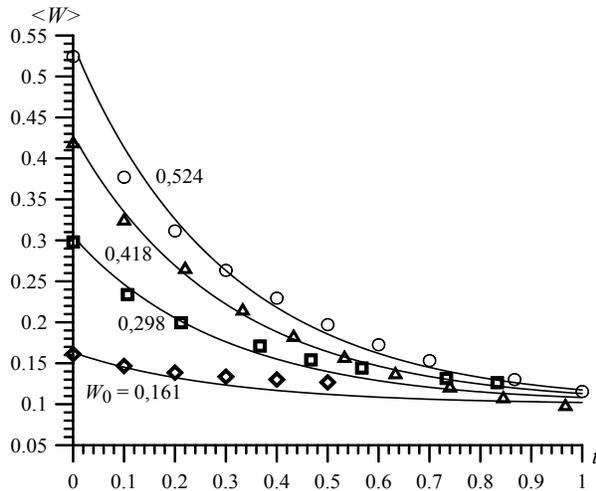


Рис. 4. Кинетика акусто-конвективной сушки силикагеля для различных значений начальной влажности (точки – эксперимент, кривые – расчет).

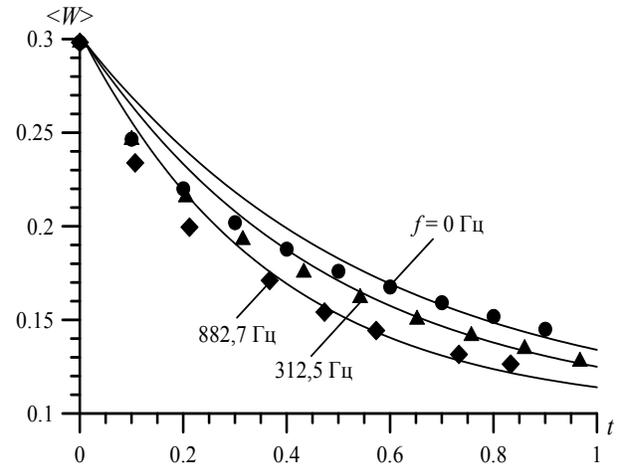


Рис. 5. Кинетика акусто-конвективной сушки силикагеля при разных частотах (точки – эксперимент, кривые – расчет).

контрольных порций силикагеля представлены на рис. 3. Отметим, что различие в динамике увлажнения в первой и второй сериях экспериментов обусловлено следующим: первая контрольная порция имела массу, почти в два раза меньшую, чем вторая контрольная порция, а следовательно, и объем. При увеличении объема загружаемого силикагеля наблюдался рост высоты засыпки зерен силикагеля в стакане, что затрудняло проникновение влажного воздуха к нижним слоям, что и приводило к значительному росту времени увлажнения второй контрольной порции.

Акусто-конвективная сушка силикагеля. Эксперименты по акусто-конвективной сушке проводились на струйной установке ИТПМ СО РАН, принцип работы которой основан на эффекте Гартмана (более подробное описание установки приведено в [1]). Порции предварительно увлажненного силикагеля помещались в плотный тканевый пакет, который крепился к подложке с помощью проволоки. Масса вспомогательного крепежного оборудования составляла 268.76 г.

Влияние начальной влажности. Было исследовано влияние начальной влажности зерен силикагеля на кинетику сушки. Для этого были подготовлены четыре порции исследуемого материала. Первая порция увлажнялась методом пропитки (рис. 2), начальная влажность имела максимальное значение и составляла $W_0 = 0.524$. Вторая и третья порции увлажнялись методом сорбции (рис. 3), и поскольку имели разную продолжительность увлажнения, то начальная влажность второй порции составила 0.418, третьей – 0.298. Четвертая порция находилась на открытом воздухе в помещении и впитывала влагу из окружающей среды. Ее влажность составляла 0.161. Во время эксперимента проводились периодические взвешивания контрольных порций.

На рис. 4 представлена динамика изменения содержания влаги в образцах силикагеля с различными значениями начальной влажности при воздействии на осушаемый материал акустических волн высокой интенсивности. Видно, что образцы с высокой начальной влажностью характеризуются повышенной интенсивностью экстракции влаги, в частности, за одинаковый интервал времени в 0.5 влажность образцов уменьшилась на 0.33, 0.25, 0.15 и 0.035 соответственно. Отметим, что четвертый образец достигает начальной влажности в сухом состоянии (до увлажнения) за 0.5, а третий образец за 0.833 единиц времени. На рис. 4 можно заметить особенность в динамике сушки образцов 1 и 2, обладающих высокой начальной влажностью, т.е. более 0.4. В отличие от образцов с низкой начальной влажностью (менее 0.3) у первых образцов наблюдается уменьшение влажности ниже начальной в сухом состоянии. Это обстоятельство вызвано разрушением зерен силикагеля в

процессе сушки, что приводит к увеличению свободной поверхности зерна, с которой осуществляется унос влаги, а также возможен незначительный унос очень мелких фракций (размером меньше ячеек тканевого пакета), отколовшихся от зерен.

Влияние частоты. Были выполнены три серии экспериментов по сушке зерен силикагеля с начальной влажностью 0.298. В первой серии применялся конвективный режим сушки, когда $f = 0$ Гц. Во второй и третьей серии частота $f = 312.5$ Гц. и $f = 882.7$ Гц.

На рис. 5 представлена динамика экстракции влаги из образцов для трех частот. Проанализируем полученные данные и сравним результаты при конвективном и акусто-конвективном режимах сушки с частотой 312.5 Гц. Давление в форкамере и расход воздуха для этих режимов одинаковы. В первые моменты времени скорости экстракции влаги для обоих режимов близки. Так, на момент времени $t = 0.2$ разница по влажности не превышает 0.003. Таким образом, можно полагать, что на данном этапе доминирует унос влаги с поверхности зерен силикагеля. К моменту $t = 0.5$ различие во влажностях составляет около 0.01, а к $t = 0.833$ достигает 0.014. Исходя из этого, становится существенным вклад акустической составляющей процесса сушки. Для достижения влажности в 0.25 обоим режимам требуется одинаковый интервал времени, в то время как до влажности в 0.2 конвективному режиму сушки требуется времени на 0.033 больше, а для достижения влажности в 0.15 – на 0.183 условные единицы времени больше.

Проведем анализ результатов, полученных при акусто-конвективном режиме сушки, но при разных частотах в 312.5 и 882.7 Гц. Давление в форкамере, а следовательно, и расход воздуха с увеличением частоты слегка растет. На момент времени $t = 0.2$ разница во влажностях составляет 0.013, к $t = 0.5$ она возрастает до 0.015, а к $t = 0.833$ – уменьшается до 0.01. Отмеченное уменьшение связано с тем обстоятельством, что зерна силикагеля достигают своей начальной влажности, которая была до увлажнения, при акусто-конвективной сушки с частотой 882.7 Гц за 0.833 времени. Заметим, что для достижения влажности в 0.25 режиму с большей частотой требуется на 0.02 меньше времени, для влажности в 0.2 разница составляет почти 0.067, а до 0.15 времени озвучивания требуется меньше на 0.137.

Следовательно, с увеличением частоты озвучивания зерен силикагеля экстракция влаги происходит более интенсивно.

Математическое моделирование сушки зерен силикагеля. Для описания влагопереноса в цилиндрической засыпке силикагеля при акусто-конвективном воздействии используем уравнение диффузии влаги, записанное в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; r и z – пространственные координаты.

Уравнение (1) дополняем начальными и граничными условиями

при $t = 0$ $W(0, r, z) = W_0$, при $(r, z) \in [0, R] \times [0, l]$;

при $r = 0$ $\partial W(t, 0, z) / \partial r = 0$; при $r = R$ $\partial W(t, R, z) / \partial r = -\alpha(W - W_K) S_{\text{бок}}$; (2)

при $z = 0$ $\partial W(t, r, 0) / \partial z = \alpha(W - W_K) S_{\text{торец}}$; при $z = l$ $\partial W(t, r, l) / \partial z = -\alpha(W - W_K) S_{\text{торец}}$;

где W – влажность в засыпке, W_0 – начальная влажность в засыпке, а W_K – конечная влажность в окружающей образец среде; α – коэффициент влагоотдачи; R – радиус цилиндрической засыпки; l – длина цилиндрического образца; $S_{\text{бок}}$ и $S_{\text{торец}}$ – площадь боковой и торцевой поверхностей образца.

Решение начально-краевой задачи (1-2) находилось численно, для чего использовался метод прямых. Для решения полученной при этом системы обыкновенных дифференциальных уравнений применяется метод, основанный на формуле дифференцирования

против потока [2].

Расчеты проводились в безразмерных переменных, за единицу масштаба длины брался радиус R , за единицу времени – продолжительность эксперимента $t_{\text{эксп}} = 30$ мин.

На рис. 4 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по зависимости изменения среднего влагосодержания в процессе акусто-конвективной сушки. Как видно согласование расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

На рис. 5 представлено изменение среднего влагосодержания силикагеля в процессе сушки образцов при различных частотах. В результате сопоставления расчетных кривых и экспериментальных данных получена зависимость коэффициента влагоотдачи от частоты акусто-конвективного воздействия, которую можно представить полиномом вида $\alpha(f) = a \cdot f^2 + b \cdot f + \alpha_0$ с коэффициентами: $a = 0.0187$; $b = 3.6399$ и $\alpha_0 = 5925.9$. Здесь α_0 – значение коэффициента влагоотдачи при частоте, равной нулю. Отметим, что полученная величина α_0 согласуется с определенной ранее в [3].

Заключение. При микроволновом способе сушки зерен силикагеля выделены три режима: поверхностный, внутренний с испарением свободной влаги и внутренний с испарением связанной влаги. Амплитудно-частотная характеристика акустического поля, характерная для установки при заданном пороговом значении давления в форкамере и ее геометрии, в последующем не зависит от дальнейшего увеличения давления в форкамере.

Проведенные эксперименты по акусто-конвективной сушке образцов показали, что:

а) при одинаковой интенсивности и частоте звукового поля зерна силикагеля, имеющие более высокую начальную влажность, характеризуются большей скоростью экстракции влаги, чем менее влажные;

б) при одинаковой начальной влажности зерен силикагеля повышение частоты озвучивания приводит к интенсификации процесса экстракции влаги.

Для описания влагопереноса в цилиндрической засыпке силикагеля при акусто-конвективном воздействии предложена плоская нестационарная физико-математическая модель диффузионного влагопереноса. В ее рамках определены коэффициент диффузии и коэффициент влагоотдачи, что позволило воссоздать динамику распределения влаги в цилиндрической засыпке зернистого силикагеля.

Проведенное сравнение экспериментальных результатов с вычисленными значениями среднего влагосодержания для кинетики акусто-конвективной сушки образцов с различной начальной влажностью показало их удовлетворительное согласование.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00239).

Список литературы

- [1] Ю.Г. Коробейников, А.В. Федоров, Е.А. Булучевский, А.В. Лавренов. Сорбент типа «соль в пористой матрице» и древесные опилки как осушители воздуха для систем вентиляции // ИФЖ. 2009. Т. 82, № 2. С. 252 – 257.
- [2] M. Berzins, P.M. Dew and R.M. Furzeland. Developing software for time-dependent problems using the method of lines and differential-algebraic integrators // Appl. Numer. Math. 1989. No 5. Pp. 375 – 397.
- [3] Ю.А. Гостеев, Ю.Г. Коробейников, А.В. Федоров, В.М. Фомин. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке // ПМТФ, 2003. Т. 44, № 3. С. 117 – 123.