

АВТОМОДЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА О СУШКЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Д. Е. Игошин

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак

Аннотация. Рассмотрена плоскоодномерная задача о тепло- и массопереносе при сушке пористого полубесконечного слоя материала. На границе, проницаемой для парогазовой смеси, температура и состав газа поддерживаются постоянными. Построены автомодельные решения, описывающие распространение температурного поля и поля влагосодержания, возникающего вследствие подвода тепла. Изучена интенсивность сушки в зависимости от исходного состояния влажной пористой среды, а также температуры и концентрационного состава парогазовой смеси на границе пористой среды.

Ключевые слова: многофазная система, пористая среда, насыщенный пар, математическое моделирование, численные методы

1. Введение

Основные уравнения, описывающие процессы тепломассопереноса при тепловом воздействии на пористые среды, получили название уравнений Лыкова [1]. Они описывают режим мягкой сушки при малых тепловых потоках, когда температура не превышает $50\text{--}70^\circ\text{C}$, что ниже температуры кипения воды. Также в [1] рассмотрены основные способы сушки влажных материалов: конвективная, кондуктивная, электромагнитная и инфракрасная. При этом основное внимание уделяется процессам влагопереноса и продолжительности сушки при достаточно мягких температурных режимах. Наиболее распространенным способом интенсифика-

ции процесса сушки материалов является повышение температуры среды, сопровождаемое одновременным повышением степени ее насыщенности. Обычно это достигается сушкой в перегретом паре [2]. При этом процесс сопровождается повышением внутреннего избыточного давления водяного пара и перемещением вглубь тела границы фазового перехода. В этом случае для применения системы уравнений Лыкова необходимо численное решение. Наиболее простые модели рассмотрены в работах [3, 4]. В [2, 5, 6, 7] рассмотрены процессы высокотемпературной сушки капиллярно-пористых материалов.

2. Математическая модель

Уравнение сохранения массы для воды и пара для одномерной задачи имеет вид:

$$m \frac{\partial}{\partial t} [(1 - S_l)\rho_v + S_l\rho_l] + \frac{\partial(\rho_v v_v)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где m — пористость; ρ_i ($i = l, v$) — плотности фаз; S_l — объемное влаго содержание в порах; v_v — скорость пара; нижние индексы l, v, r здесь и далее соответствуют воде (liquid — жидкость), пару (vapor) и пористому скелету (rubber — резина). Процесс массопереноса пара будем описывать законом Фика

$$\rho_v v_v = -m(1 - S_l)D \frac{\partial \rho_v}{\partial x}, \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии. Уравнение теплового баланса запишем в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + mL \rho_l \frac{\partial S_l}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\rho c = (1 - m) \rho_r c_r + m \rho_l c_l S_l, \quad \lambda = (1 - m) \lambda_r + m \lambda_l S_l.$$

Здесь T — температура; ρc — удельно-объемная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности системы «пористая среда–вода»; L — удельная теплота парообразования воды; c_i , λ_i — удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности компонентов ($i = r, l$). Последнее слагаемое в (3) соответствует тепловому эффекту фазовых переходов во влажной зоне. В сухой зоне ($0 < x < x_{(s)}$) это слагаемое равно нулю.

Будем полагать пар калорически совершенным, v для него примем уравнение Менделеева–Клапейрона. В зоне совместного присутствия пара и жидкости, температура и давление удовлетворяют уравнению Клапейрона–Клаузиуса при условии $\rho_v \ll \rho_l$ получим формулу, связывающую текущую температуру с парциальной плотностью пара во влажной

зоне

$$\rho_v = \frac{\mu_v p^*}{RT} \exp\left(-\frac{T^*}{T}\right), \quad (4)$$

где T^* и p^* — эмпирические параметры, определяемые на основе табличных данных для зависимости температуры насыщения от давления.

В связи с тем, что при тепловом воздействии на пористую среду возникают зоны, в которых вода может находиться в различных агрегатных состояниях, приведенные выше уравнения необходимо дополнить соотношениями на границе сухой и влажной зон ($x = x_{(s)}$), которые следуют из условия теплового баланса и закона сохранения массы

$$\begin{aligned} \rho_v (v_v^+ - \dot{x}_{(s)}) (1 - S_{l(s)}) - \rho_v (v_v^- - \dot{x}_{(s)}) &= \rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \\ \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^+ - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^- &= mL\rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \quad \dot{x}_{(s)} = \frac{dx_{(s)}}{dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

На этой границе температура и плотность пара полагаются непрерывными, причем парциальная плотность пара с температурой $T(s)$ связана формулой (4)

$$T^- = T^+ = T_{(s)}, \quad \rho^- = \rho^+ = \rho_{(s)}, \quad \rho_{(s)} = \rho(T_{(s)}).$$

Индексы «-» и «+» соответствуют значениям величин за фронтом и перед фронтом движущейся границы, нижний индекс «(s)» соответствует значениям параметров на границе сухой и влажной зон — скорость движения границы.

Условия баланса массы и тепла (5) с учетом закона Фика (2) записуются в виде:

$$\begin{aligned} D \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial x}\right)_{(s)}^- - m(1 - S_{l(s)}) D \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial x}\right)_{(s)}^+ &= m\rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \\ [(1-m)\lambda_r + m\lambda_l S_{l(s)}] \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^+ - (1-m)\lambda_r \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^- &= mL\rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть в исходном состоянии влажный материал характеризуется по всей толщине температурой T_0 и объемным влагосодержанием S_{l0} . В порах кроме воды находится парогазовая смесь, то есть смесь воздуха и насыщенного водяного пара, плотность которого ρ_v . Будем полагать, что на границе ($x = 0$) температура и массовая концентрация внезапно изменяются соответственно до значений T_e и ρ_{ve} (обе величины могут быть как больше, так и меньше исходных) и поддерживаются постоянными. Такой режим сушки соответствует интенсивному обдуву материала внешним

($x = 0$) потоком воздуха, имеющего постоянную влажность. Эти условия могут быть записаны в виде начальных и граничных соотношений.

Область, расположенная ниже кривых (включая сами кривые) на Рис. 1, соответствует возможным начально-граничным условиям рассматриваемой задачи под давлением одной атмосферы. Участок кривой в интервале температур от 0°C до 100°C соответствует зависимости равновесной парциальной плотности пара от температуры, определяемой выражением (4), а на участке, где температура выше температуры кипения воды ($T > 100^\circ\text{C}$) показана зависимость парциальной плотности пара, при которой парциальное давление перегретого пара равно одной атмосфере. Точка О, лежащая на линии, определяемой формулой (4), соответствует начальному состоянию пористой среды, точки А, В, С, D соответствуют граничным условиям. В частности, точки А и В соответствуют случаю, когда пористая среда обдувается сухим холодным и горячим воздухом, точка D — перегретым паром, точка С — перегретой паровоздушной смесью. На Рис. 2 представлены распределения температуры, влагосодержания, плотности пара и воздуха в пористой среде, соответствующие различным режимам сушки. Для параметров, определяющих начальные, граничные условия и свойства системы, здесь приняты следующие значения: $S_{l0} = 0.1$, $m = 0.5$, $p = 0.1$ МПа, $p_* = 1.1 \sim 10^5$ МПа, $T_* = 5186$ К, $\rho_l = 1000$ кг/м³, $c_l = 4200$ Дж/(кг·К), $\rho_r = 925$ кг/м³, $c_r = 1000$ Дж/(кг·К), $\lambda_r = 0.15$ Вт/(м·К), $\lambda_r = 0.65$ Вт/(м·К), $L = 2.26 \cdot 10^6$ Дж/кг. Если не будет специально указано, то и в последующих численных примерах для параметров газопароводонасыщенной пористой среды будут использованы эти значения.

Из рисунков видно, что под действием горячего сухого воздуха основной перепад температур происходит в ближней зоне, особенно, если исходная температура повышена. Например, при $T_e = 160^\circ\text{C}$ и $T_0 = 20^\circ\text{C}$ температура на границе влажной зоны падает до $T_{(s)} = 60^\circ\text{C}$, то есть перепад температур достигает 100°C в сухой зоне и 40°C во влажной. С ростом внешней температуры также растет температура на границе влажной зоны, а это ведет к росту плотности водяного пара на ней, так как здесь пар насыщенный. Если на внешней границе пар отсутствует, то в сухой зоне его плотность растет с глубиной и достигает максимального значения на границе влажной зоны. Там пар становится насыщенным. В более глубоких слоях температура падает, что ведет к уменьшению плотности водяного пара. При сушке горячим воздухом транспорт воды с границы влажной зоны осуществляется в обе стороны, что с одной стороны приводит к появлению «горба» влагосодержания, а с другой — к существенному увеличению размера сухой зоны при равных внешних температурах. Если поток тепла со внешней границы отсутствует (этого

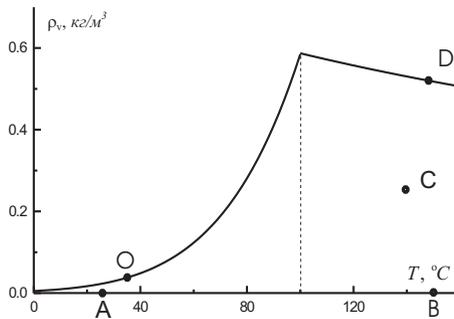


Рис. 1. Фазовая диаграмма возможных начально-граничных условий пористой среды

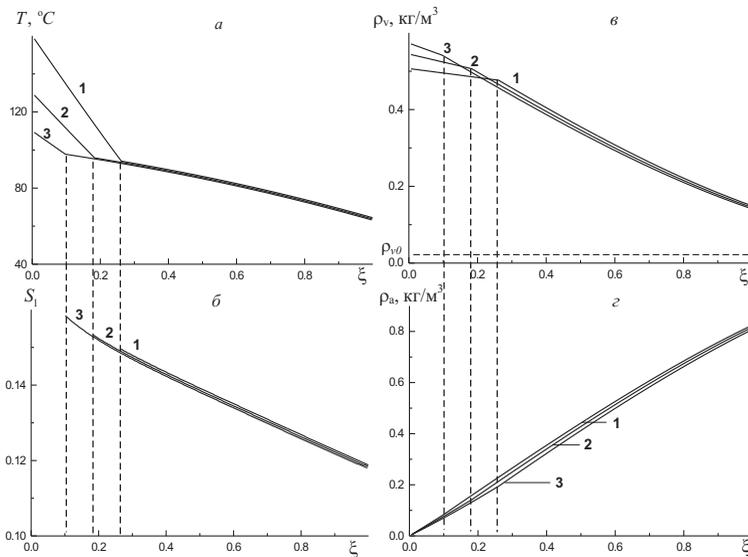


Рис. 2. Профили температуры (а), объемного влагосодержания (б), плотности пара (в) и воздуха (г), при различных внешних температурах. Линия 1 соответствует внешней температуре 160°C , линия 2 соответствует 130°C , линия 3 соответствует 110°C , всюду массовая концентрация пара $k_{ve} = 1$ (чистый пар), исходная температура 20°C , $S_{l0} = 0.1$

можно добиться, если материал обдувать холодным воздухом, то массоперенос с границы влажной зоны направлен только наружу (плотность водяного пара всюду растет с глубиной), но он очень слабый, так как осуществляется за счет внутренней энергии самого материала, что приводит к его охлаждению. Чрезмерное повышение внешней температуры может привести к перегреву материала и его повреждению.

3. Заключение

Представленная модель, описывающая тепломассоперенос при сушке пористого материала, позволяет рассматривать различные режимы процесса с произвольными начально-граничными условиями (температура материала, влагосодержание, внешние температура и содержание пара). Показано, что при сушке горячим воздухом глубина проникновения сухой зоны больше, чем при сушке паром той же температуры. Связано это с тем, что при сушке паром происходит засасывание влаги вглубь материала. Однако степень прогрева вещества больше при сушке паром, что будет способствовать лучшему удалению влаги из материала меньшей толщины при достижении температуры кипения.

Список литературы

- [1] Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
- [2] Шубин Г. С. Развитие методов расчета продолжительности высокотемпературной сушки плоских материалов и новые ее режимы для сушки древесины // Т. 9. С. 30–40.
- [3] Бабенко В. Е., Буевич Ю. А., Шепчук Н. М. Квазистационарный режим сушки сферической частицы // ТОХТ. 1975. № 2. С. 247–277.
- [4] Кумер И. Дж., Гупта Л. Н. Приближенное решение обобщенной задачи Стефана для пористой среды с переменными теплофизическими свойствами // Тепломассообмен-V: Материалы V Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Минск, 1976. Т. 5. С. 187–197.
- [5] Акулич П. В. Тепломассоперенос в капиллярно-пористых материалах, сопровождаемый углублением зоны испарения // Сб. материалов IV Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск. 2000. Т. 9. С. 175–179.

-
- [6] Акулич П. В., Гринчик Н. Н. Моделирование тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 2. С. 225–232.
- [7] Корнюхин И. П., Жмакин Л. И. Система дифференциальных уравнений тепломассообмена в процессе сушки пористых тел // Сб. материалов IV Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск. 2000. Т. 9. С. 66–75.
- [8] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [9] Физические величины: Справочник/ А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.