

УДК 536.2:532/533; 517.958:539.219.3

*У. М. ХАРМА*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОГЛОТИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,  
e-mail: abuhawash@hotmail.com*

Приведены результаты численного моделирования неизо термического влагопереноса в пористом поглотителе электромагнитной энергии с учетом явления термовлагопроводности. Анализ полей влагосодержания, давления пара, температуры для различных моментов времени показывает существенное перераспределение влаги в неизо термических условиях, которое необходимо учитывать при маскировке объекта.

*Ключевые слова:* неизо термический влагоперенос, пористый поглотитель, электромагнитная энергия, изотерма сорбции, термовлагопроводность.

*О. М. KHRMA*

### **MODELLING OF NON-ISOTHERMAL MOISTURE TRANSFER IN ABSORBERS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,  
e-mail: abuhawash@hotmail.com*

Results of numerical modeling of non-isothermal moisture transfer in porous absorber of electromagnetic energy in view of the phenomena of heat and moisture are presented. An analysis of the moisture content of fields, steam pressure and temperature for different times shows a significant distribution of moisture in non-isothermal conditions, which must be considered when masking object.

*Keywords:* nonisothermal moisture transfer, porous absorber, electromagnetic energy, sorption isotherm, heat and moisture.

**Введение.** Как известно [1–7], вода является эффективным поглотителем электромагнитной энергии СВЧ-поля, что может использоваться в материалах для маскировки объектов. Наиболее эффективно использование воды, находящейся не в свободном, а в капиллярно-связанном состоянии в пористом материале. В отличие от воды в макрообъеме свойства тонких, моно- и полимолекулярных ее слоев в капиллярно-пористых структурах зависят от межмолекулярных сил притяжения на границах раздела смежных сред. Связанная вода обладает повышенными плотностью, вязкостью, относительной диэлектрической проницаемостью.

Если радиус капилляра меньше  $10^{-7}$  м, то под действием сил поверхностного натяжения жидкость может оказаться в метастабильном состоянии, так как ее капиллярное давление  $P_c = \frac{2\sigma \cos\Theta}{r} < 0$ , и, следовательно, находится при отрицательных давлениях, что может привести к релаксационным фазовым переходам с участием термодинамически неустойчивых состояний – спиnodального распада [7]. Существенно, что при  $P_c < 0$  жидкость является метастабильной и могут происходить ее спонтанное вскипание и конденсация.

Для моделирования процессов переноса в пористых средах часто используют процессы переноса в отдельном капилляре, а также уравнения Навье–Стокса с соответствующими краевыми условиями. Однако в этом случае сложно оценить глубину «захода» жидкости в метастабильное состояние, время вскипания, а также образование пузырьков и их влияние на течение в капилляре. Фазовое равновесие в этом случае необходимо понимать в динамическом смысле, так как во внутрипоровом пространстве постоянно происходят процессы вскипания и конденсации фаз.

Эффект поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в СВЧ-диапазоне длин волн возрастает при повышенном содержании солей в водном растворе. При этом добавка (например, хлористого кальция) обеспечивает одновременно морозостойкость влагосодержащего пористого экрана. Отметим, что во многих случаях обеспечение малозаметности объекта затруднительно в неизотермических условиях, когда экран располагают над «горячей» поверхностью (например, нагретым корпусом танка) и существует разница температур между поверхностью и окружающей средой.

Вследствие явления термовлагопроводности происходят движение влаги в холодные части образца и практически полное насыщение пористой структуры водным раствором электролита. Эффект поглощения электромагнитной энергии в этом случае уменьшается и материал не обеспечивает требуемой маскировки.

**Математическая модель.** Как правило, влагосодержащие экраны располагают в герметических оболочках, поэтому в дальнейшем потоки пара в окружающую среду через оболочку не учитываем. При численном моделировании будем использовать разработанную нами ранее физико-математическую модель неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах [8, 9], которая базируется на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции влаги пористым материалом, термодинамических уравнениях Кельвина, Клапейрона–Клаузиуса. При данном подходе количество эмпирических коэффициентов переноса значительно уменьшается. Задачу формулируем в одномерной постановке. Схематически модель изображена на рис. 1.

На границах раздела смежных сред металл – поглотитель – воздух происходит теплообмен по закону Ньютона. Окружающая среда имеет температуру  $T_c$ , экранируемая поверхность – температуру  $T_s$ , которую полагаем постоянной величиной.

При построении физической модели будем использовать допущение о справедливости выполнения гипотезы локального термодинамического равновесия в элементарном макрообъеме пористого тела, что можно обосновать следующим образом. В пористой среде граница двух фаз разбивается на множество отдельных участков с различной кривизной  $R_0$ , близкой по порядку величины к размеру  $R_0$  порового канала. В [7, 8] показано, что время релаксации и переход в состояние термического равновесия имеют тот же порядок, что и время установления динамического массообменного равновесия между жидкостью и паром. Неравновесный процесс движения влаги в этом случае необходимо понимать как квазиравновесный процесс, когда каждый локальный макрообъем пористого тела проходит через непрерывный ряд мгновенных состояний локального термодинамического равновесия (ЛТР) между фазами. В большинстве ситуаций гипотеза ЛТР является достаточно обоснованной как в теории сушки А. В. Лыкова при определении массообменных характеристик, так и в теории двухфазной фильтрации при определении функции Леверетта. В [7] показано, что, как правило, время релаксации много меньше характерных времен протекания процессов движения влаги в пористой структуре. На границе поглотителя и окружающей среды происходит теплообмен по закону Ньютона.

**Постановка задачи.** Рассмотрим пористый влажный образец (ткань) толщиной 5 мм с начальным влагосодержанием 2 кг/кг и температурой  $T_0 = 293$  К, помещенный в оболочку, непроницаемую для пара и влаги. Левая граница образца ( $x = 0$ ) контактирует с окружающей средой с температурой  $T_c = 20$  °С, а правая граница – с экранируемым металлическим объектом (например, площадка над работающим двигателем танка) с температурой  $T_s = 50$  °С. Коэффициент теплообмена между тканью и окружающей средой полагаем  $\alpha_0 = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), между тканью и металлом –  $\alpha_R = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Известна изотерма сорбции ткани:

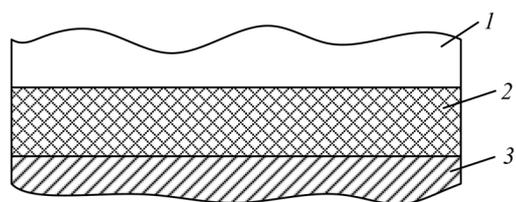


Рис. 1. Схема модели расчета: 1 – окружающая среда; 2 – пористый поглотитель ЭМИ; 3 – экранируемая поверхность

теплообмена между тканью и окружающей средой полагаем  $\alpha_0 = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), между тканью и металлом –  $\alpha_R = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Известна изотерма сорбции ткани:

$$u_e = 4 \left( \frac{1}{1 - 10 \ln \varphi} + \frac{1}{1 - 20 \ln \varphi} \right), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность.

Физические параметры для ткани: проницаемость  $K = 1 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>, плотность  $\rho = 100$  кг/м<sup>3</sup>, пористость  $m = 0,8$ , теплопроводность  $\lambda = 0,2$  Вт/(м·К), эффективная

теплоемкость  $C_p = 0,9 \cdot 10^6$  Дж/(кг·К). Начальное внутрипоровое давление пара определяется из изотермы сорбции данного материала по методике [7–9]:  $P_{n0} = 2000$  Па. Капиллярные перетоки влаги существенны для капиллярно-пористых сред при  $\phi \geq 0,7$ , когда равновесное влагосодержание, согласно (1), превышает  $u_e(0,7)$ .

В данной работе учитывается движение влаги только вследствие процесса перемещения паров внутри ткани. Капиллярные течения в микрокапиллярах, согласно [7], могут вносить дополнительный вклад в данный процесс, но направление движения в холодные части пористой структуры за счет градиента температуры может только усиливать данный эффект. Кроме того, в настоящее время отсутствуют методы определения обобщенного коэффициента фильтрации капиллярной жидкости, так как этот параметр можно определить только из решения обратной задачи на основе экспериментальных данных. Систему дифференциальных уравнений тепло-массопереноса можно представить в виде:

уравнение переноса пара

$$m \frac{\partial(\rho_v \theta_v)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_v K_0 f_v}{\eta_v} \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) - I, \quad (2)$$

уравнение переноса энергии

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + LI. \quad (3)$$

Используя изотерму сорбции (1) и замыкающие соотношения:

состояние идеального газа (пара)

$$P_v = \rho_v RT / v'', \quad (4)$$

зависимость (аппроксимация) давления насыщенного пара от температуры (погрешность 10–15%)

$$P_s = 10^5 \left( \frac{T}{373} \right)^{15}, \quad (5)$$

выражение для удельной теплоты фазового перехода

$$L = r_0 - \frac{RT^2}{v''_{liq}} \left( \frac{\partial \ln P_v}{\partial T} \right)_{P_{liq}}, \quad (6)$$

выражение интенсивности массообмена между фазами

$$I = \rho_s \frac{\partial u_e}{\partial t} = \rho_s \left( \frac{\partial u_e}{\partial P_v} \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} + \rho_s \left( \frac{\partial u_e}{\partial T} \right)_{\rho_v} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными  $T$  и  $P_v$ .

Используя зависимость  $\theta_v = 1 - \theta_{liq} = 1 - \frac{\rho_s}{m \rho_{liq}} u_{liq}$  и закон для идеального газа (4), левую часть уравнения переноса пара (2) запишем в виде

$$\begin{aligned} m \frac{\partial(\rho_v \theta_v)}{\partial t} &= m \theta_v \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + m \rho_v \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = m \theta_v \frac{v''}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P_v}{T} \right) + m \frac{P_v v''}{RT} \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \\ &= \left( m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v''}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \left( m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v'' P_v}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P_v v'' \rho_s}{RT \rho_{liq}} \frac{\partial u_{liq}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение фильтрации пара имеет вид

$$\begin{aligned} &\left( - \left( m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v'' P_v}{RT^2} + \rho_s \left( \frac{\partial u_e}{\partial T} \right)_{P_v} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \\ &+ \left( - \left( m - \frac{\rho_s}{\rho_{liq}} u_{liq} \right) \frac{v''}{RT} + \rho_s \left( \frac{\partial u_e}{\partial P_v} \right)_T \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v v'' \rho_s}{RT \rho_{liq}} \frac{\partial u_{liq}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_v K_0 f_v}{\eta_v} \left( \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

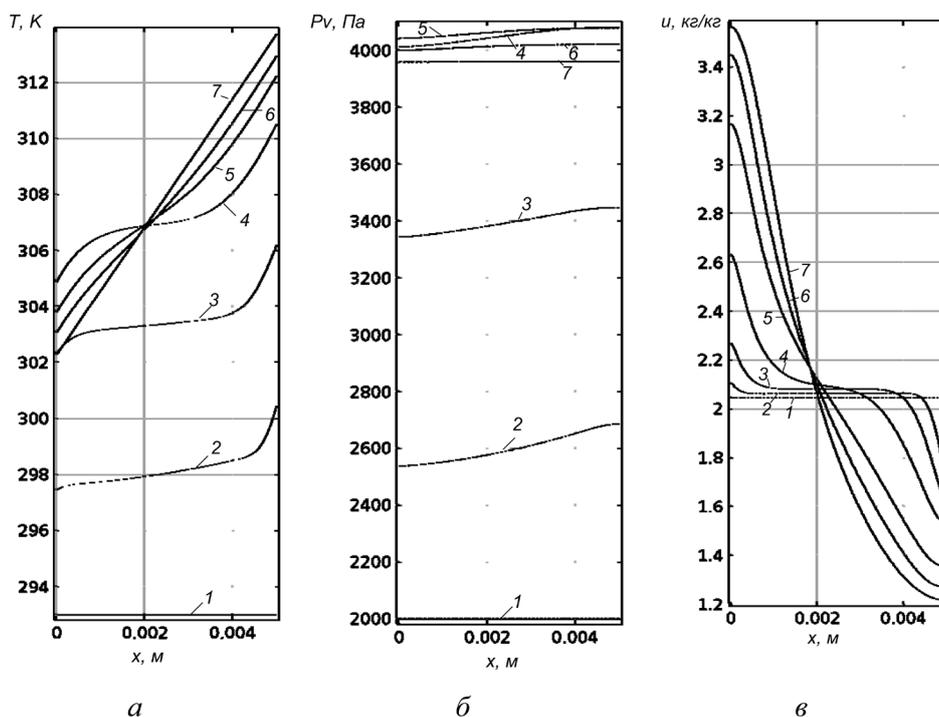


Рис. 2 Распределение температуры (а), давления пара (б), влагосодержания (в) по сечению образца для различных моментов времени: 1 – 0 с, 2 – 20, 3 – 60, 4 – 180 с, 5 – 540, 6 – 900, 7 – 2700 с

Краевые условия для уравнений (3), (9):

$$t = 0: T(x, 0) = T_0, P_v(x, 0) = P_{v0}, \quad (10)$$

$$x = 0: \frac{\partial P_v}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0(T - T_c), \quad (11)$$

$$x = R: \frac{\partial P_v}{\partial x} \Big|_{x=R} = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha_R(T - T_3). \quad (12)$$

В данном случае  $\alpha_0$  – коэффициент теплообмена поглотителя с окружающей средой, а  $\alpha_R$  – коэффициент теплообмена поглотителя с маскируемым объектом.

Численный метод решения системы уравнений (1)–(12) изложен в [8, 9]. На рис. 2 приведены результаты численного расчета полей влагосодержания, давления пара и температуры для различных моментов времени для одномерного случая. Вследствие повышения температуры возрастает внутрипоровое давление паров воды, а градиенты температуры приводят к движению и конденсации паров воды в холодных частях образца ткани. Отметим, что, как правило, внутрипоровая жидкость обладает хорошей электропроводностью и ее накопление на поверхности ткани (контакт с окружающей средой) может привести к значительному увеличению отражающей способности электромагнитных полей и эффект маскировки, обусловленный поглощением ЭМИ в гетерогенной пористой структуре, значительно снижается. Ввиду этого необходимы меры по поддержанию поглотителя ЭМИ в изотермических условиях, например обдувом поглотителя теплым воздухом от работающего двигателя или охлаждением поверхности техники обдувом атмосферным воздухом (под поглотителем).

В данной задаче не учитывалось влияние капиллярных сил, но, как было показано в [7], качественный характер эволюции во времени полей влагосодержания, давления пара, температуры сохраняется. Кроме того, ткань является средой с двойной пористостью (сочетание макро- и микропор), в которых, как известно, действие капиллярных течений не является существенным.

**Заключение.** Приведены результаты численного моделирования неизо термического влагопереноса в пористом поглотителе электромагнитной энергии с учетом явления термовлагопро-

водности. Анализ полей влагосодержания, давления пара, температуры для различных моментов времени показывает зависимость распределения влаги от градиента температур, которую необходимо учитывать при маскировке объекта.

### Обозначения

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость пористого тела, Дж/(кг·К);  $c_{pliq}$ ,  $c_{ps}$ ,  $c_{pv}$  – теплоемкость жидкой, твердой и газообразной фазы, Дж/(кг·К);  $I$  – интенсивность массообмена между фазами, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $K$  – коэффициент проницаемости пористой среды, м<sup>2</sup>;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $m$  – пористость, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $P_c$  – капиллярное давление, Па;  $P_{liq}$  – давление жидкости, Па;  $P_s$  – давление насыщенного пара, Па;  $P_v$  – давление пара, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $r_0$  – удельная теплота испарения свободной жидкости, Дж/кг;  $t$  – время, с;  $T$  – температура, К;  $u_e$  – равновесное влагосодержание, кг/м<sup>3</sup>;  $u_{liq}$  – влагосодержание, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{liq}''$ ,  $v_v''$  – молярная масса жидкости и водяного пара, кг/моль;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\eta_v$  – динамическая вязкость пара и жидкости, Па·с;  $\Theta$  – краевой угол смачивания, град;  $\theta_{liq}$ ,  $\theta_v$  – насыщенность пористой среды жидкостью и паром, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность пористой среды, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{liq}$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_v$  – плотность жидкой, твердой и газообразной фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\varphi$  – относительная влажность паров.

### Список использованной литературы

1. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах / Т. В. Борботько [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2006. – 230 с.
2. Технические средства защиты информации: тезисы докл. XII Белорусско-российской научно-технической конференции (Минск, 28–29 мая 2014 г.) / [редколлегия: Л. М. Лыньков и др.]. – Минск, БГУИР, 2014. – 79 с.
3. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Омер Джамаль Саад Абулькасим [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2014. – 159 с.
4. Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электрическому, оптическому и акустическому каналам / Х. М. Алялябад [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2010. – 226 с.
5. Абдулькадер, А. Х. Тепловые и оптические каналы утечки информации. Методы и средства защиты / А. Х. Абдулькадер, Т. В. Борботько, Л. М. Лыньков. – Минск: Бестпринт, 2012 – 176 с.
6. Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения / Н. В. Колбун [и др.] // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия В. «Прикладные науки. Промышленность». – 2004. – № 12. – С. 30–34.
7. Гринчик, Н. Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах / Н. Н. Гринчик. – Минск, 1991. – 251 с.
8. Моделирование тепловлагопереноса в древесине при досушке энергией свч-поля / Н. Н. Гринчик [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 37–43.
9. Гринчик, Н. Н. К проблеме неизотермического влагопереноса в капиллярно-пористых средах / Н. Н. Гринчик, У. М. Харма, Т. Е. Щелак // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 4. – С. 71–79.

Поступила в редакцию 04.03.2016