

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАССОПЕРЕНОСА

Никитенко Н.И.¹, Снежкин Ю.Ф.¹, Сороковая Н.Н.¹, Кольчик Ю.Н.²

1–Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев,

2– Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Разработан метод определения коэффициента диффузии связанного вещества в зависимости от его концентрации в капиллярно-пористых телах, который заключается в измерении во времени веса образца, приведенного в контакт с жидкой средой. Результаты численных и физических экспериментов свидетельствуют о простоте и достаточно высокой степени точности предложенного метода.

A method for determining the diffusion coefficient associated substance depending on its concentration in the capillary-porous bodies, which consists of measuring the weight of the sample time, brought into contact with the liquid-medium. The results of numerical and physical experiments show the simplicity and relatively high degree of accuracy of the proposed method.

Ключевые слова: способ определения коэффициента диффузии, капиллярно-пористые материалы, обратная задача массопереноса, метод дискретного совмещения

Существующие методы определения коэффициента диффузии разделяются [1] на стационарные и нестационарные. Коэффициент диффузии в этих методах определяется либо на основе закона диффузии массы Фика, либо в результате решения дифференциального уравнения массопереноса. Большинство методов предполагает определение локальных значений концентрации связанного компонента, что приводит к значительным погрешностям. В нестационарных методах ощутимая погрешность часто обусловлена тем, что при проведении опытов не удастся определить достаточно точное значение локальной концентрации, к которой должен быть отнесен найденный коэффициент диффузии [1]. Значительные погрешности ряда методов связаны с тем, что в их основе лежат приближенные аналитические решения линейных задач массопереноса.

Хотя процессы диффузии и теплопроводности математически описываются аналогичными уравнениями, методы определения коэффициентов диффузии и теплопроводности, как правило, отличаются существенно. Это обусловлено тем, что экспериментальное определение локальных значений температуры значительно проще и точнее измерения локальных значений объемной концентрации диффундирующего компонента, и наоборот определение осредненных по объему значений температуры намного сложнее, чем объемной концентрации.

Основная цель, которая была поставлена при разработке нового способа определения коэффициента диффузии связанного вещества в капиллярно-пористом теле в зависимости от его объемной концентрации, состояла в следующем [2]. Упростить проведение эксперимента путем исключения измерений локальных концентраций в отдельных точках образца и устранить ограничения на его форму при обеспечении погрешности, которая близка к погрешности исходной информации.

Поставленная задача решается следующим образом. Перед началом эксперимента определяется начальное распределение концентрации связанного вещества путем термостатирования образца при определенной температуре и давлении с последующим взвешиванием. Затем исследуемый образец помещается целиком или частично в среду чистого жидкого или газообразного связанного вещества с той же температурой, и в дальнейшем объемная концентрация связанного вещества на поверхности образца U_f в период проведения эксперимента поддерживается постоянной. Для случая жидкой среды условие $U_f = const$ обеспечивается автоматически, для газовой среды оно может быть удовлетворено путем перемешивания. Производятся замеры веса образца через некоторые интервалы времени до момента t_k , когда его вес достигает постоянного значения $G_k = G_k(t_k)$. Это значение используется для определения концентрации связанного вещества U_f в образце в окрестности его наружной поверхности путем деления веса связанного вещества в образце на его объем. Поскольку для определения коэффициента диффузии по предлагаемому способу требуется проводить измерение только одной функции – веса образца в зависимости от времени – предлагаемый способ целесообразно называть методом взвешивания.

Опытные образцы могут иметь, вообще говоря, произвольную форму. Однако для упрощения процедуры расчета коэффициента диффузии на базе данных измерений, целесообразно образец выполнять в виде пластины, цилиндра или шара. Результаты измерений веса G_j образца в моменты времени t_j ($j = 0, 1, \dots, J$) служат входными данными для численного решения обратной коэффициентной задачи диффузии, позволяющей определить искомую зависимость коэффициента диффузии D от объемной концентрации U связанного вещества в капиллярно-пористом теле.

Математическая модель прямой задачи массопереноса в одномерной постановке при постоянной температуре включает уравнение диффузии

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^g} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^g \frac{\partial U}{\partial r} \right), \quad (0 < r < R, \quad 0 \leq t \leq t_K), \quad (1)$$

где g — геометрический параметр, который принимает значения 0, 1 и 2 для плоского, цилиндрического и сферического образца; r — пространственная координата. Принимается, что в начальный момент времени $t = 0$ образец находится в равновесном состоянии, т.е.

$$U(r, 0) = U^0 \quad (2)$$

На границе $r = R$ обеспечивается условие

$$U(R, t) = U_R = \text{const} \quad (3)$$

На границе $r = 0$ для пластины задается условие, аналогичное (3), если она помещается целиком в однородную внешнюю среду, и в виде

$$\partial U(0, t) / \partial r = 0 \quad (4)$$

если поток связанного вещества на этой границе отсутствует.

Для нахождения при заданной температуре коэффициента диффузии $D = D(U)$ на базе уравнений (1) – (4) используется следующее дополнительное условие, которое представляет косвенную информацию о влиянии коэффициента диффузии на изменение веса образца во времени:

$$\int U(r, t) dV = G(t) - G^0 \quad (5)$$

где $G(t)$ — вес образца в моменты времени t ; G^0 — вес сухого образца; V — объем образца. Современная измерительная техника позволяет практически непрерывно производить измерения и запись веса образцов с высокой степенью точности.

Решение системы уравнений (1) – (5) представляет собой некорректно поставленную обратную задачу. Для ее решения используется общий метод дискретного совмещения Никитенко Н.И. [3–5] для решения такого рода задач. В соответствии с этим методом функция D определяется в результате поиска модельной функции объемной концентрации U_m при заданной температуре, которая удовлетворяет уравнения (1) – (4) во всей рассматриваемой области, а дополнительное условие (5) удовлетворяется в конечном или счетном множестве точек. Число последних определяется в каждом конкретном случае до начала или в процессе решения с учетом требуемой точности решения и погрешности входных данных.

Реализация метода дискретного совмещения включает три этапа. На первом этапе неизвестная функция D выражается через конечное число J варьируемых параметров α_j ($j = 0, 1, \dots, J-1$). Принимая во внимание, что экспериментально определяемые выражения для коэффициента диффузии D обычно представляются полиномиальными зависимостями, функция D представляется при заданной температуре T_0 во всем диапазоне изменения концентрации в виде усеченного степенного ряда

$$D(U, T_0) = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2 + \dots + \alpha_{J-1} U^{J-1} \quad (6)$$

Число J параметров α_j определяется до или в процессе решения в зависимости от вида обратной задачи, требуемой точности решения и погрешности входных данных. Если в интервале изменения аргумента U функция D имеет сложный характер, то этот интервал разбивается на ряд подинтервалов и в каждом из них функция D аппроксимируется многочленом вида (6).

Для нахождения параметров α_j ($j = 1, 2, \dots, J-1$) используется предложенный в [3] метод последовательной минимизации невязок η_j , который позволяет достаточно быстро находить значения параметров D_j , и обеспечивает практически нулевую невязку η_j между измеренным G_j и модельным значением веса образца G_{mj} , определяемым в результате численного интегрирования модельной функции $U_m(r, t_j)$ на временном слое t_j в интервале $r_n < r < r_K$, например, по формуле трапеций. В первом приближении значения параметров α_j могут быть заданы произвольно.

Если коэффициенты многочлена (6) некоторым образом определены в k -том приближении, тогда приходим к прямой задаче диффузии (1) – (4). Ее решение может быть проведено методом сеток. Система разностных уравнений, которая аппроксимирует уравнения (1) – (5) на базе явной трехслойной разностной схемы Никитенко Н.И. [4] на сетке $r_i = ih$ ($i = 0, 1, \dots, I$; $h = R/I$); $t_n = t_{n-1} + l_n$ ($n = 0, 1, \dots$; $t_0 = 0$; $l_n > 0$) для плоской пластины, имеет вид:

$$(1 + \theta) \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{l_n} - \theta \frac{U_i^n - U_i^{n-1}}{l_{n-1}} = \frac{(D_{i+1}^n + D_i^n)(U_{i+1}^n - U_i^n) - (D_i^n + D_{i-1}^n)(U_i^n - U_{i-1}^n)}{2h^2} \quad (7)$$

$$U_i^0 = U^0 \quad (8)$$

$$U_I^n = U_R \quad (9)$$

$$\frac{U_0^{n+1} - U_0^n}{l_n} = \frac{(D_1^n + D_0^n)(U_1^{n+1} - U_0^{n+1})}{h^2}, \quad (10)$$

$$\eta_{(k)}^{n+1} = \frac{G(t) - G^0}{V} - \frac{h}{2} (U_0^{n+1} + 2U_1^{n+1} + 2U_2^{n+1} + \dots + 2U_{I-1}^{n+1} + U_I^{n+1}) \quad (11)$$

Весовой параметр $\theta \geq 0$ позволяет устранить ограничения на шаг по времени. Его значение выбирается исходя из условия устойчивости решения уравнения (7): $l_n \leq (1 - 2\theta)h^2 / (2D_{\max}^n)$, где D_{\max}^n – максимальное значение коэффициента диффузии, определяемое из выражения (6) в k -том приближении. Сеточные уравнения (7) – (10) аппроксимируют уравнения (1) – (4) с погрешностью порядка $l_n + h^2$. Уравнение (11) определяет с погрешностью того же порядка невязку между расчетным и измеренным значениями содержания связанного вещества в единичном объеме в моменты времени t_n , $n = 0, 1, \dots$

Полученная в результате решения этой прямой задачи модельная функция U_i^{n+1} в соответствии с методом дискретного совмещения считается решением обратной задачи диффузии, если варьируемые коэффициенты α_j ($j = 0, 1, \dots, J - 1$) функции D подобраны таким образом, что условие (6) оказывается удовлетворенным в J точках t_0^* , t_1^* , ..., t_{J-1}^* ременного интервала $0 \leq t \leq t_k$.

Совокупность невязок $\eta_{j(k)}$ образуют J - мерный вектор невязок, который служит базой для последующих приближений. Все компоненты вектора в процессе решения методом дискретного совмещения должны быть сведены к нулю. При численной реализации метода на ЭВМ последнее условие означает, что искомые значения параметров ($\alpha_{j(k)}$ $j = 0, 1, \dots, J - 1$) должны обеспечивать удовлетворение условия

$$|\eta_j| < \delta, \quad j = 0, 1, \dots, J - 1 \quad (12)$$

где δ – некоторое малое положительное число, близкое к машинному нулю.

На втором этапе осуществляется поиск таких значений α_j ($j = 0, 1, \dots, J$), которые обеспечивают функцию U_m условия (12). Для этой цели используется предложенный Н.И. Никитенко метод последовательной минимизации невязок [3]. Сущность последнего состоит в следующем. Каждому параметру системы α_j ставится в соответствие невязка η_j в определенный момент времени t_j^* .

В первом приближении значения параметров α_j принимаются произвольно, например, $\alpha_{0(1)} = const$, $\alpha_{j(1)} = 0$, ($j = 1, \dots, J - 1$). В результате решения прямой задачи переноса находится невязка $\eta_{0(1)}$ в первом приближении. Затем делается небольшой пробный шаг $\Delta\alpha_{0(1)} = \alpha_{0(2)} - \alpha_{0(1)}$ по параметру α_0 и вновь решается прямая задача. Это позволяет найти значение невязки $\eta_{0(2)}$ во втором приближении, приращение невязки $\Delta\eta_{0(1)} = \eta_{0(2)} - \eta_{0(1)}$ и приближенное значение производной $(\partial\eta_0 / \partial\alpha_0)_{(1)} = \Delta\eta_{0(1)} / \Delta\alpha_{0(1)}$. Далее выполняется несколько рабочих шагов по параметру α_0 при фиксированных значениях остальных параметров системы до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (12) для значения $j=0$. Величина рабочих шагов определяется согласно формуле

$$\Delta\alpha_j = B\eta_j \frac{\partial\alpha_j}{\partial\eta_j} \quad (13)$$

когда коэффициент $B=1$. Производная $\partial\alpha_j / \partial\eta_j$ может уточняться после каждого β -го рабочего шага:

$$\left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial \eta_j} \right)_\beta = \frac{\alpha_{j(\beta)} - \alpha_{j(\beta-1)}}{\eta_{j(\beta)} - \eta_{j(\beta-1)}} \quad (14)$$

После завершения цикла вычислений, обеспечивающего удовлетворение условия $|\eta_0| < \delta$, осуществляется пробный шаг $\Delta \alpha_{1(1)} = \alpha_{1(2)} - \alpha_{1(1)}$ по параметру α_1 . Изменение последнего может привести к нарушению условия $|\eta_0| < \delta$, поэтому после каждого шага по параметру α_1 проводится цикл вычислений для параметра α_0 , в котором достигается удовлетворение условия $|\eta_0| < \delta$.

Предположим, что для невязок η_j , ($j = 0, 1, \dots, s$; $s < J - 1$), отвечающих параметрам α_j , ($j = 0, 1, \dots, s$), условие (12) уже удовлетворено и требуется определить значения параметров $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{s+1}$, обеспечивающих удовлетворение неравенства (12) для $j = 0, 1, \dots, s + 1$. Вначале делается пробный шаг $\Delta \alpha_{s+1(1)}$ по параметру α_{s+1} , т.е. принимается $\alpha_{s+1(2)} = \alpha_{s+1(1)} - \Delta \alpha_{s+1(1)}$. После каждого β -го шага по параметру α_{s+1} проводится цикл вычислений, который связан с изменением параметров $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_s$ до тех пор, пока не будет удовлетворено условие $|\eta_j| < \delta$, $j = 0, 1, \dots, s$. В этом цикле для нахождения производной $(\partial \eta_j / \partial \alpha_j)_{(1)}$ пробные шаги не осуществляются. Эта производная берется из предыдущего цикла, причем приращение $\Delta \alpha_{j(1)}$ в данном случае вычисляется по формуле (14) при $0 < B < 1$. Расчет α_{s+1} прекращается, когда условие (12) будет выполняться для всех η_j , ($j = 0, 1, \dots, s + 1$).

Третий этап связан с обеспечением минимальной погрешности решения на заданной информации. Если условие (5) содержит N значений веса образца, отвечающих различным временным координатам, причем $N > J$, то в качестве меры отклонения модельной функции U_m от заданной совокупности экспериментальных данных может служить средняя абсолютная невязка, отвечающая числу варьируемых параметров J :

$$\bar{\eta}_{N,J} = \frac{1}{N} \sum_{\beta=1}^N |\eta_{j,J}| \quad (15)$$

Выбор числа J может проводиться в ходе решения обратной задачи исходя из условия $\bar{\eta}_{N,j} < \bar{\eta}_{N,j-1}$. Если увеличение числа параметров α_j не приводит к уменьшению погрешности решения, т.е. $\bar{\eta}_{N,j+1} \geq \bar{\eta}_{N,j}$, то в этом случае J считается окончательным числом варьируемых параметров для данной задачи и решение обратной задачи прекращается. Когда величина $\bar{\eta}_{N,J}$ значительно превышает погрешность исходных данных, повышение точности решения обратной задачи может быть достигнуто рациональным выбором из множества N экспериментальных данных тех значений, которым ставятся в соответствие варьируемые параметры α_j , или путем предварительного сглаживания исходной информации, например при помощи метода динамической фильтрации Калмана [6].

Рассмотренный метод поиска параметров α_j является сходящимся в случае, когда зависимость невязки η_j от α_j является выпуклой (это условие всегда выполняется для линейных корректно поставленных задач). В отдельных случаях, когда зависимость η_j от α_j является сложной, целесообразно использовать способ [6], который аналогичен известному методу половинного деления для решения нелинейных алгебраических уравнений. Сходимость этого метода является медленной, однако для его сходимости требуется только непрерывность указанной зависимости. Поскольку реализация метода дискретного совмещения предполагает решение цепочки прямых корректно поставленных задач переноса, непрерывная зависимость η_j от α_j является обеспеченной.

Представленный выше метод позволяет определить зависимость коэффициента диффузии от концентрации U связанного вещества в капиллярно-пористом теле при заданной температуре T_0 . Проведение экспериментов при разных температурах T позволяет установить зависимость $D = D(U, T)$ от концентрации и температуры. Однако это требует значительных затрат труда и времени для проведения экспериментов и обработки их результатов. В рамках молекулярно-радиационной теории переноса Никитенко Н. И. [7] получена формула для коэффициента диффузии в конденсированных системах

$$D(U, T) = D_0 / (\exp[A/(kT)] - 1) \quad (16)$$

Здесь $D_0 = a_b^2 e_b / 3 \neq D_0(T)$; a_b – среднее расстояние, преодолеваемое атомом за один диффузионный перескок; e_b – осредненный по частотам коэффициент излучения частицы тела; A – энергия активации частичек тела; k – постоянная Больцмана. Формула (16) хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [7] и в предельных случаях при $A/kT \gg 1$ переходит в формулу Аррениуса для твердых тел и при $A/kT \ll 1$ – в формулу Эйнштейна для жидкостей.

Запишем формулу (16) для температур T и T_0 и разделим одно выражение на другое:

$$D(U, T) = D(U, T_0) (\exp[A/(kT_0)] - 1) / (\exp[A/(kT)] - 1) \quad (17)$$

Здесь функция $D = D(U, T_0)$ связана выражением (6) с варьируемыми параметрами α_j ($j = 0, 1, \dots, J-1$), которые определяется при температуре T_0 . Таким образом соотношение (17) позволяет получить зависимость коэффициента диффузии от объемной концентрации связанного вещества и температуры на базе одного эксперимента.

Для выяснения эффективности и точности определения коэффициента диффузии проведены следующие численные эксперименты. Полагаем что функция $D = D(U)$ описывается полиномом (6), в котором удерживается три первых члена, т.е. $D(U) = D_1 + D_2U + D_3U^2$. С использованием этого выражения путем решения прямой задачи диффузии (1) – (4) находятся значения веса образца G_j в моменты времени t_j ($j = 1, 2, 3$) интервала $0 < t < t_k$, например в моменты $t_1 = t_k$, $t_2 = 2t_k/3$, $t_3 = t_k/3$. Найденные таким образом значения G_1, G_2, G_3 рассматриваются как точные значения веса образца для моментов времени, в которые они измеряются экспериментально с некоторой относительной погрешностью $\Pi_j = (G_j - \tilde{G}_j) / G_j$. Для имитации погрешности измерений веса образца использовался датчик псевдослучайных чисел, распределенных по нормальному закону при заданной средней относительной погрешности Π . Зависимость погрешности Π_D нахождения коэффициента диффузии предлагаемым способом от погрешности Π измерения используемых при этом входных данных позволяет оценить качество способа.

Результаты численных экспериментов показали, что при $\Pi = 0$ средняя $\bar{\Pi}_D$ и максимальная Π_{Dmax} погрешность определения коэффициента диффузии $D(U)$ не превышает 0,1 %. При погрешности исходных данных (взвешивания образца) $\Pi < 2\%$ средняя погрешность $\bar{\Pi}_{Di} \approx \Pi$, а максимальная $\Pi_{Dmax} \approx 1,7\Pi$.

На базе описанного метода проведены эксперименты по определению коэффициента диффузии в слое капиллярно-пористого тела (силикатного кирпича), толщиной 12 мм. Высушенный в сушильной камере образец приводится в контакт с водой одной из наружных поверхностей при температуре 20 °С. Производятся замеры веса образца во времени до момента, когда его вес становится практически неизменным. Зависимость коэффициента диффузии от объемной концентрации U находится на основе метода дискретного совмещения в виде двучлена $D = D_0 + D_1U$. Значение D_0 и D_1 найдены при условии совмещения расчетных и экспериментальных данных в моменты времени 5 и 60 мин: $D_0 = 0,843 \cdot 10^{-5}$ и $D_1 = 0,2938 \cdot 10^{-7}$. На рисунке 1 представлены результаты расчета по найденной зависимости $D = D(U)$ веса образца от времени и экспериментальные данные. Они достаточно хорошо согласуются.

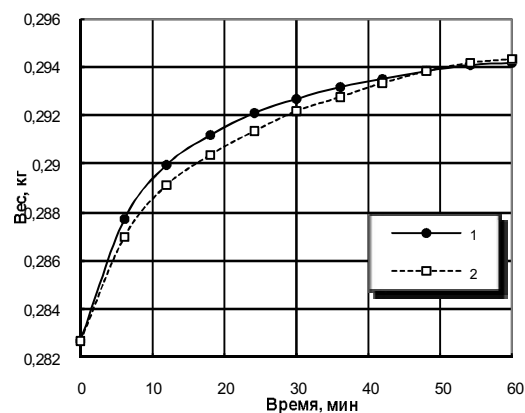


Рис. 1 – Графики изменения веса влажного капиллярно-пористого образца, которые построены в результате расчета на базе найденной по изложенному методу зависимости $D = D(U, T_0)$ (сплошная линия) и непосредственно взвешивания (штриховая линия).

Выводы

Разработан метод определения коэффициента диффузии связанного вещества в зависимости от его концентрации в капиллярно-пористых телах, который заключается в измерении во времени веса образца, приведенного в контакт с жидкой средой. Результаты численных и физических экспериментов свидетельствуют о простоте и достаточно высокой степени точности предложенного метода.

Література

1. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. Москва: Химия, 1980. –248 с.
2. Патент на винахід №89307 України С12G 3/00, G01N 25/18 „Спосіб визначення коефіцієнта дифузії зв’язаної речовини в капілярно-пористих матеріалах”/ Нікітенко М.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Заявл. 17.06.2008; Опубл. 11.01.2010; Бюл. № 1
3. Никитенко Н. И. Теория теплопереноса. –Киев: Наук. думка. –1983. –352 с.
4. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи теплопереноса. – Киев: Наук. думка. –1988. – 240 с.
5. Никитенко Н. И. Принцип дискретного совмещения в некорректно поставленных задачах тепло- и массопереноса // Доп.НАН України. –1995. –№ 3. –С. 54–56.
6. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. – Киев: Наук. Думка.– 2002. Т 1. – 407с.
7. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ. –2000. –Т. 73, –№ 4. –С. 851–860.

УДК 664.834.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ СВЧ-ПОЛЯ ПО ТЕМПУ НАГРЕВА МОДЕЛЬНОГО ТЕЛА

Погожих Н.И. д-р техн. наук, профессор, **Потапов В.А.** д-р техн. наук, доцент,
Цуркан Н.М. канд. техн. наук, доцент, **Гриценко О.Ю.** магистр
Харьковский государственный университет питания и торговли, г. Харьков

Рассмотрен вопрос определения напряженности электромагнитного поля для различной нагрузки СВЧ-камеры на основе калориметрических измерений для модельных объектов разной геометрической формы.

The question of determinations of the electromagnetic field for the different loading of MV-chamber is considered on the basis of the calorimetry measurings for the model objects of different geometrical form.

Ключевые слова: термодинамическая система, напряженность СВЧ-поля, калориметрические измерения, темп нагрева.

Процессы сушки разнообразных материалов являются достаточно энергозатратными во всех промышленных отраслях. В значительной мере это касается и пищевой промышленности, поэтому определение путей повышения энергоэффективности соответствующих технологических процессов в пищевой промышленности является приоритетной проблемой для отраслевой науки. Одним из перспективных научных направлений есть применение в процессах сушки пищевого сырья СВЧ-энергии.

Данная работа проведена в рамках научной концепции, в соответствии с которой процесс сушки представляет собой эволюцию определенной термодинамической системы от некоторого начального неравновесного состояния, через максимум свободной энергии к состоянию равновесия, которое отвечает окончанию процесса [1]. При этом на пути управляемой эволюции система испытывает определенное тепловое или механическое влияние, а также их комплексное действие. Одним из видов влияния на термодинамическую систему есть действие силового СВЧ-поля в виде теплоты, в которую превращается часть его энергии в диэлектрическом материале. Соответственно, поиск энергоэффективных путей реализации процессов сушки с использованием СВЧ-энергии нуждается в теоретическом и экспериментальном моделировании теплообмена в определенной термодинамической системе, которую представляет собой обезвоживаемый материал.

Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-нагрева разнообразных диэлектрических материалов на протяжении уже нескольких десятилетий свидетельствуют о том, что, хотя теория СВЧ-нагрева диэлектрических материалов достаточно развита, практическая ее реализация нуждается в индивидуальном подходе в каждом конкретном случае. Это связано как с характеристиками самого объекта, так и с характеристиками СВЧ-поля для определенного аппаратурного решения [2].

Для выяснения механизмов воздействия электромагнитного поля (ЭЛМП) на нанобъекты, к которым относятся микрокапилляры пищевого сырья, необходимо знание его параметров, по-крайней мере, оценки их средних значений в сырье. Косвенным методом определения основной силовой характеристи-