

Этой формулой определяется следующий график:

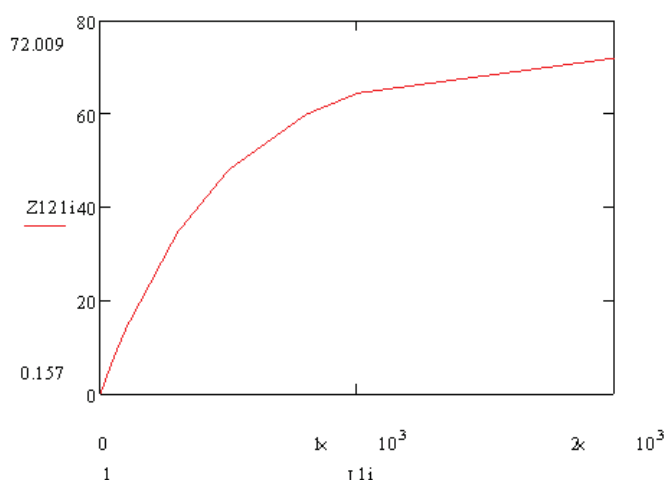


Рис. 1 – Зависимость температурного перегрева внешней поверхности ИТС $Z_{12H} = T_{CT} - T_{OC}$ от времени τ_{1i} в секундах, для указанных условий

Используя информацию о начальном периоде нагрева слоя в виде формул или графиков, можно переходить к расчёту процесса сушки.

Литература

1. Бурдо О.Г., Мілінчук С.І., Зиков О.В. Нові теплотехнології зерносушіння. // Наук.-вироб. журнал – Випуск 3 – Одеса: Одеська національна академія харчових технологій – 2006. – С.16-21.
2. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 1999. – Вип. 21. – С.234–237.
3. Н.Ф. Smirnov, E.V. Voskresenskaya THE GRAIN LAYER DRYING APPROXIMATED MODEL // 8th Minsk International Seminar_Heat Pipes_Heat Pumps_Refrigerators_Pover Sources_, –September 12-15, –2011, –Belarus, –Vol.2, –2011, –p.203-208.
4. Воскресенская Е.В. Особенности кинетики процесса сушки в термосифонно-механическом агрегате // Одеса. – Наукові праці. – Вип.37. – 2010. – 84с.

УДК 664.4

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛА С МИКРОВОЛНОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**Бошкова И.Л., к.т.н., доцент; Колесниченко Н.А., аспирантка
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса**

Преставлены результаты исследований теплового эффекта взаимодействия диэлектрических материалов с микроволновым электромагнитным полем. Оценивается доля тепловых потерь в общем тепловом потоке, получаемым в результате микроволнового нагрева. Анализируются данные по диэлектрическим характеристикам материала в зависимости от его вида, влажности, насыпной плотности и температуры. Рассмотрена возможность определения напряженности электрического поля с помощью теплового метода.

Prestavleny results of the thermal effect of the interaction of dielectric materials with microwave electromagnetic field. Estimated proportion of heat loss in the total heat flow, are a result of microwave heating. Data are analyzed by the dielectric characteristics of the material depends on its type, moisture and temperature of the bulk density. The possibility of determining the electric field with the aid of a thermal method.

Ключевые слова: теплота, микроволновое поле, толщина слоя, объем, КПД, диэлектрические характеристики, напряженность.

Особенности нагрева в микроволновом поле, определяемые также спецификой структуры диэлектрического материала (в основном — органического происхождения), накладывают ряд ограничений, непосредственно связанных с требованиями к качеству конечного продукта. К примеру, при сушке плотного слоя зерна высокоинтенсивные процессы, которые характеризовались лучшими показателями по энергоэффективности и скорости, являются недопустимыми, поскольку вследствие высокой скорости роста температуры и роста давления происходило разрушение внутренней структуры (зерна, особенно при нагреве зерен с твердой оболочкой, или — керамического изделия, как при обжиге глины), к запариванию межзернового пространства, что также ухудшало характеристики материала, а при сушке с высоким влагосодержанием сырье начинало вариться, что наблюдалось при сушке макаронных изделий. Предпосевная обработка семян в микроволновом поле обнаруживала эффект биостимуляции при незначительном повышении температуры, при этом также обнаруживалось дезинфицирующее и дезинсектицирующее действие. Наблюдаемые явления требовали определения причин, вызывающих их, и развития моделей, которые позволяли бы проводить расчеты. Как показал опыт наших исследований, для каждой задачи (сушка, нагрев, стимуляция) для получения достоверных расчетных данных необходимо разрабатывать собственную модель, учитывающей основные факторы, управляющие процессом и исключающей вторичные для данной задачи, и решать ее с соответствующими условиями однозначности. В то же время, физические представления о механизме микроволнового нагрева являются общими и они должны учитываться при создании математических моделей, отражающих причинно-следственные связи явлений. К этому относится представление процесса преобразования электромагнитного поля в теплоту, явления затухания мощности по глубине, формирования потоков массы во внутренней структуре материала, связь диэлектрических и тепловых характеристик.

Особую сложность составляет определение напряженности электрического поля в материале. Аналитические зависимости для расчета этой величины сложны и малоприменимы. В то же время, для расчета микроволновой энергии, преобразованной в тепловую, необходимо значение напряженности электрического поля. Удельная мощность, выделяющаяся в виде тепла в единице объема материала, находящегося в микроволновом поле, выражается уравнением (1), и связана с его диэлектрическими характеристиками, частотой МВ поля и напряженностью [1]:

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \epsilon' \cdot tg\delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3. \quad (1)$$

Для оценки напряженности E и определения ее зависимости от формы образца, его массы и диэлектрических характеристик, можно использовать эту формулу и данные экспериментов, в которых следовало измерить изменение температуры Δt материала массой m и теплоемкостью c , изменение массы за счет испарения Δm (если этот процесс имел место). Из уравнения теплового баланса (без учета потерь в окружающую среду) можно определить значение напряженности электрического поля:

$$E = \sqrt{\frac{q_{пол}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \epsilon' \cdot tg\delta}} = \sqrt{\frac{cm\Delta t + \Delta m r}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \epsilon' \cdot tg\delta \cdot V \cdot \tau}}, \text{ В/м}. \quad (2)$$

Удельный тепловой поток $q_{пол}$, который пошел на нагрев исследуемого образца, объем которого составлял V , и испарение влаги в количестве Δm , определяется зависимостью:

$$q_{пол} = (cm\Delta t + \Delta m r) / \tau, \text{ Вт/м}^3. \quad (3)$$

Зависимость (2) можно уточнить, учтя потери в окружающую среду, которые определяются лучистой $Q_{луч}$ и конвективной $Q_{конв}$ составляющей. Кроме того, точность расчета зависит также от точности определения величин диэлектрических постоянных и от равномерности распределения электромагнитного поля в материале.

В результате нагрева материала начинают расти потери в окружающую среду, которые включают лучистую и конвективную составляющие. Расчеты этих величин, включая полезный тепловой поток $Q_{пол}$, проведенные для различных масс материала, толщины слоя δ и площади поверхности $F_{пов}$, приведены в табл. 1.

Для исследования особенностей поглощения микроволновой энергии представляет интерес изучение зависимости величины поглощенной микроволновой энергии от загрузки камеры. Ниже приводятся результаты экспериментов, проведенных на дистиллированной воде при начальной температуре 20 °С при изменении ее массы от 0,05 до 1,1 кг. Выходная мощность микроволнового источника составляла 800 Вт. Здесь КПД — коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение поглощенной энергии к выходной мощности магнетрона. Коэффициент полезного действия камеры определяется следующим образом:

$$\eta_k = Q_{пол} / N_{вых}. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Тепловые потоки при различной массе и организации слоя зернового материала

№	m , кг	$F_{\text{пов}} \cdot 10^3$, м ²	t , °С	δ , м	$Q_{\text{луч}}$, Вт	$Q_{\text{конв}}$, Вт	$Q_{\text{поль}}$, Вт	η_k
1	0,05	18,4	60	0,008	1,3	6,9	33,6	0,21
2	0,06	15	68	0,016	1,25	7,1	38	0,24
3	0,1	18,4	75	0,016	2,08	10,5	48,6	0,3
4	0,15	28,6	65	0,016	3,1	11,7	51,24	0,32
5	0,2	39,6	55	0,009	3,3	12,0	50,5	0,32
6	0,2	29,4	83	0,032	5,0	18,1	69,4	0,43
7	0,31	59,8	47	0,009	4,7	12,1	48,4	0,31
8	0,31	33,2	90	0,016	7,9	22,0	84,2	0,53
9	0,31	11,2	98	0,048	8,3	10	58,4	0,37

Результаты экспериментов показывают, что с ростом массы воды общий КПД непрерывно возрастает (рис. 1), достигая своего максимального значения при $m = 1,1$ кг, что позволяет говорить о достижении оптимальной загрузки данной камеры.

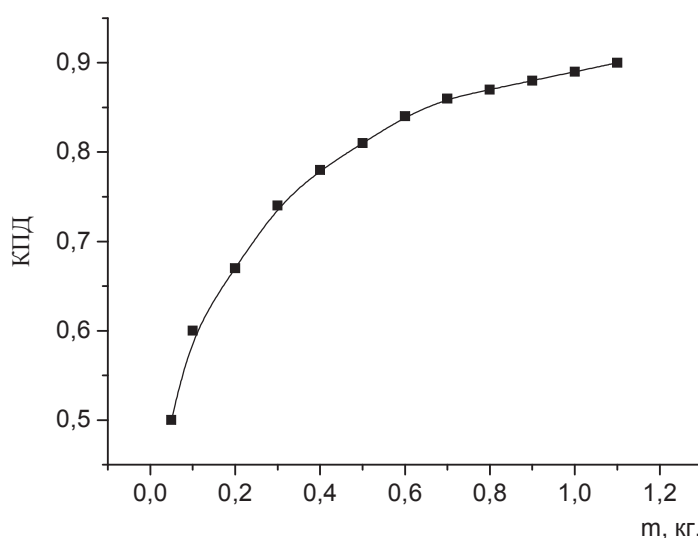


Рис. 1. Зависимость КПД микроволновой камеры от массы воды. $N_{\text{вых}} = 800$ Вт

Эффективность поглощения микроволновой энергии у воды заметно выше, чем у зерна, диэлектрические свойства которого хуже. Это отражается также в значениях КПД. Результаты расчетов коэффициентов использования тепловой энергии, а также КПД микроволновой камеры в зависимости от массы зернового материала (гречиха) при подводимой мощности $N_{\text{вых}} = 160$ Вт представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, линия 1, коэффициент использования тепловой энергии практически не зависит от массы для области значений 0,06-1,2 кг. КПД МВ камеры с ростом массы возрастает, достигая постоянного значения 0,56 при массе 1,2 кг. Верхняя кривая показывает, что микроволновая энергия, поступающая от генератора, используется недостаточно полно. Однако ранее это явление связывалось с потерями в окружающую среду. В то же время анализ данных табл. 1 показывает, что для образцов с одинаковой массой в образце с меньшей толщиной потери теплоты меньше, количество энергии, преобразованной в тепловую, меньше, КПД меньше, при этом температура образца ниже.

При изменении массы образца от 0,05 кг до 1,2 кг и изменении относительного объема $V_{\text{обп}}/V_k$ от 0,003 до 0,07 КПД камеры при толщине слоя $16 < l < 66$ мм описывается с погрешностью $\pm 1,5$ % соотношением (5) [2]:

$$\eta_k = 0,56 \cdot \left(1 - \frac{4,63}{5,87 + e^{182V_{\text{обп}}/V_k}} \right). \quad (5)$$

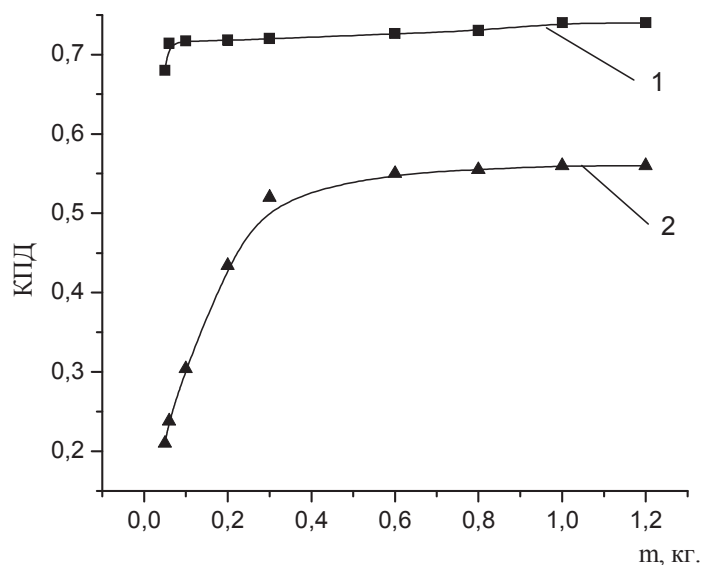


Рис. 2. Залежність КПД МВ камери (2) і коефіцієнта використання теплової енергії (1) від маси гречихи

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки. Глибина проникнення мікрохвильового поля в воду становить порядку 0,8 см — в зернові матеріали около 3 см. Тому при проникненні в воду енергія по товщині затухає суттєво інтенсивніше, ніж по товщині зерна. Енергія, яку матеріал не поглинув, виходить, відбивається від стінок камери, багаторазово перебивається і потрапляє назад в магнетрон, частково — назад на матеріал. Чим більша частка енергії здатна поглинутися за один проход шару, тим ефективніше проходить процес перетворення мікрохвильової енергії, тим менша її частка втрачається. В шару зерна внаслідок низьких значень діелектричних характеристик мікрохвильова енергія значно менше перетворюється во внутрішню енергію, більше перебивається і втрачається, що призводить до зниження напруженості електричного поля в камері, зниженню частки енергії, поглиненої матеріалом, і, відповідно, зниженню КПД мікрохвильової камери. Таким чином, дослідження теплових процесів в матеріалі при взаємодії з мікрохвильовим полем дозволило виявити основну причину, по якій змінюється напруженість поля в матеріалі при зміні його геометрії (товщини, площі поверхні, відкритої для випаровування).

Для оцінки теплового ефекту взаємодії мікрохвильового поля з матеріалом потрібні знання діелектричних характеристик, таких як відносна діелектрична проникність ϵ' , тангенс кута втрат $\text{tg}\delta$ і коефіцієнт втрат $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg}\delta$. Теоретичні представлення про діелектричні характеристики не дають можливості їх визначення розрахунковим шляхом, тому необхідно проведення експериментів, метою яких являлось вимірювання вказаних діелектричних характеристик. Вимірювання проводились на рослинних матеріалах, які використовуються при термообробці в різних технологіях (екстрагування, сушки, біостимуляції). Подібні дослідження проводяться в роботах, проводимих під керівництвом проф. Нельсона [3, 4], свідчення про які служили отправною точкою при складанні методик і обробки результатів, однак безпосередньо застосувати їх не представлялось можливим через відсутність аналогічної номенклатурної бази і обмеженого обсягу даних. Для визначення значень ϵ' і ϵ'' рослинного матеріалу застосовано резонансний метод, основна ідея якого полягає в визначенні резонансної частоти і добротності резонатора спочатку без діелектричного зразка, а потім з зразком, поміщеним в резонатор [5]. Вибір типів приладів визначався частотним діапазоном, для якого вимірюються величини ϵ' і ϵ'' . Оскільки в наших дослідженнях застосовуються магнетрони з частотою генерації мікрохвильового поля $f = 2450$ МГц, вимірювання цих характеристик проводились на хвилях сантиметрового діапазону.

Значення ϵ'' і $\text{tg}\delta$ залежать від температури матеріалу, вологості, насипної щільності, складу, збереження добавок. Для визначення значень цих величин проводились вимірювання резонансної частоти і добротності спеціального резонатора з матеріалом і без нього, з наступними обчисленнями ϵ''

и $\operatorname{tg}\delta$. Диэлектрические характеристики для различных видов материалов с различной влажностью и плотностью были измерены на описанном выше стенде [6,7]. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Результаты показывают, что с увеличением влажности диэлектрическая проницаемость ϵ' пшеницы возрастает. Значения $\operatorname{tg}\delta$ сложным образом зависят от влажности, однако можно отметить, что с ростом влажности зерна величина тангенса диэлектрических потерь имеет тенденцию к возрастанию. Величина фактора потерь, определяемая произведением $\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg}\delta$, для пшеницы твердой находится в пределах $\epsilon'' = 1,62 \div 4,84$; для пшеницы мягкой $\epsilon'' = 1,53 \div 4,34$ к.п.м $\approx 1,53 \div 4,34$. Таким образом, сорт зерна оказывает слабое влияние на фактор потерь, однако снижение влагосодержания заметно уменьшает способность материала преобразовывать энергию МВ поля. Так, если при начальном влагосодержании $u_0 = 0,192$ (что в среднем соответствует значению влагосодержания зерна, поступающего в зерносушилки) пшеницы мягкой $\epsilon'' = 2,76$, то при конечном $u_k = 0,13$ $\epsilon'' = 1,8$, т.е. изменение составляет 35 %. Для сравнения, вода при температуре 25 °С имеет значения $\epsilon' = 78$, $\operatorname{tg}\delta = 0,16$, или $\epsilon'' = 12,5$ [8]. Таким образом, интенсивность преобразования микроволновой энергии в тепловую для воды в несколько раз выше, чем для зерновых.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы. В исследуемом диапазоне температур (от 20 °С до 80 °С) величина ϵ' монотонно снижалась, причем конечное значение уменьшилось на 35..41 % по сравнению с начальным. Величина $\operatorname{tg}\delta$ меняется слабо и это изменение не носит регулярный характер. Изменение плотности материала при фиксированной температуре приводит к росту ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$, соответственно, значительному увеличению коэффициента потерь ϵ'' . В свою очередь, рост ϵ'' приводит к пропорциональному увеличению мощности, выделяющейся в виде теплоты в единице объема. Следовательно, для повышения эффективности использования энергии микроволнового поля в процессах сушки или экстрагирования растительных материалов следует стремиться к увеличению плотности слоя.

Распределение модуля напряженности электрического поля по толщине материала на частоте 2,45 ГГц носят осциллирующий характер. Напряженность электрического поля зависит от мощности электромагнитного поля, которая затухает вследствие поглощения по глубине слоя, и от длины волны, которая определяется диэлектрическими свойствами среды. [9]. Анализ причин появления неравномерностей в распределении температуры и влагосодержания материала при сушке в МВ поле подробно приведен в [5]. Эти неравномерности и являются причиной перегрева одних участков материала и недостаточного нагрева других. Неравномерность распределения существенно зависит от распределения температуры и влажности в нагреваемом материале, причем эта зависимость усложняется тем, что температура и влажность, в свою очередь, существенно зависят от источников тепла, и, следовательно, от ϵ' и E . От температурного поля в материале зависит перемещение влаги и, следовательно, температурное поле оказывает влияние на поле влажности. Эта зависимость, связанная с явлениями термовлагопроводности, испарения и конденсации, указана соответствующими стрелками. Изменение температуры и влажности приводят к изменению механических напряжений и деформаций, иногда сопровождающихся растрескиванием и разрушением материала.

Изменение полей температуры и влажности оказывают обратное влияние на электрическое поле. Так, например, пересушивание некоторых областей материала приводит к изменению ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ материала, следовательно, сопровождается изменением напряженности поля и удельных потерь в материале.

Энергия при проникновении вглубь материала поглощается и ослабевает. Толщина диэлектрика, на которой мощность внутренних источников теплоты уменьшается в e раз, принимаем за глубину проникновения [1]. При толщине образца, превышающей удвоенное значение глубины проникновения, равномерность распределения температуры и влагосодержания будет существенно нарушена при любых условиях. Для оценки глубины проникновения МВ поля в слой можно воспользоваться известными теоретическими зависимостями [1]. Коэффициент ослабления α с учетом полученных данных, например, для зерна, можно легко рассчитать:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \cdot \epsilon' \left[\sqrt{1 + \operatorname{tg}\delta^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = \frac{2\pi}{12,24 \cdot 10^{-2}} \left[\frac{1}{2} \cdot 9,04 \left[\sqrt{1 + 0,26^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = 19,88 \text{ м}^{-1}, \quad (6)$$

где λ_0 — длина электромагнитной волны в вакууме.

Для МВ поля с частотой 2450 МГц $\lambda_0 = 12,24$ см. Диэлектрические характеристики, для которых определялось значение коэффициента ослабления, соответствовали значениям для зерна пшеницы при температуре 20 °С и влагосодержании 0,16 кг/кг: $\epsilon' = 9,04$, $\operatorname{tg}\delta = 0,26$.

Видно, что для расчета теплоты, преобразованной в тепловую при действии микроволнового поля, по зависимости (1), не хватает данных по среднему значению напряженности электрического поля E . Как было показано выше, для получения значений диэлектрических характеристик существуют надежные

методики, а также имеется достаточный массив данных для различных веществ при различных влагосодержании, плотности и температуры. Расчеты, проведенные по зависимостям, предложенным в [9], получены с большой погрешностью вследствие неопределенности значений электропроводности и некоторых других коэффициентов. Кроме того, существующие методики рассматривают стационарное тепловое состояние. Для получения знаний о характере изменения величины напряженности при изменении формы и объема загрузки пришлось вернуться к тепловому методу. Данные расчета напряженности электрического поля по зависимости (2) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Среднее значение напряженности электрического поля в материале (пшеница) при различной массе засыпки m , площади поверхности образца $F_{нов}$ и толщины слоя l . T – конечная температура материала

№ опыта	m , кг	$F_{нов} \cdot 10^3$, м ²	t , °C	l , м	$Q_{пол}$, Вт	E , В/м
1	0,05	18,4	60	0,008	41,8	141,7
2	0,06	15	68	0,016	46,35	136,3
3	0,1	18,4	75	0,016	61,18	121,3
4	0,15	28,6	65	0,016	63,04	100,5
5	0,2	39,6	55	0,009	65,8	88,9
6	0,2	29,4	83	0,032	92,5	105,4
7	0,31	59,8	47	0,009	65,2	71,1
8	0,31	33,2	90	0,048	113,2	93,7

При одинаковой массе напряженность электрического поля выше в образцах с большей толщиной. Этот результат на первый взгляд казался противоречащим теории. Действительно, можно было предполагать, что образцы с меньшей толщиной слоя и, соответственно, большей поверхностью, будут иметь большую среднюю напряженность электрического поля, чем в образцах с меньшей открытой поверхностью и большей толщиной, поскольку чем больше поверхность, тем больше микроволновой энергии попадает на образец. При прохождении вглубь образца микроволновая энергия уменьшается по закону Ламберта вследствие поглощения. Анализ экспериментальных данных привел к выводу, что проблема связана с особенностями резонансных камер. Остаточная МВ энергия, пройдя через слой образца и не поглощенная материалом, отразившись от стенок камеры, попадет обратно в магнетрон.

Расчет среднего значения напряженности электрического поля может быть произведен по зависимости:

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{N_{вых} \cdot \eta_k}{(5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \epsilon' \cdot tg\delta) \cdot V}}, \quad (6)$$

где $N_{вых}$ — выходная мощность магнетрона;

η_k — КПД микроволновой камеры. Значение η_k находится по соответствующим эмпирическим зависимостям.

Тогда для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии микроволнового поля, можно применить следующую зависимость:

$$q = \frac{N_{вых} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт/м}^3. \quad (7)$$

Здесь V — объем, занимаемый материалом.

Для проведения расчетов следует располагать знаниями по КПД камеры, в котором должны учитываться объем материала, его толщина (высота) и площадь открытой поверхности, на которую падет электромагнитное поле.

Выводы

1. Теплота, выделяемая в материале при взаимодействии микроволнового электромагнитного поля с полярным диэлектрическим материалом, может быть численно определена при наличии данных по КПД микроволновой камеры.

2. Для оценки средней напряженности электрического поля E в материале рационально применить тепловой метод, основанный на данных по тепловому эффекту преобразования микроволновой энергии заданного объема и с определенной формой его организации в камере.

3. Наибольшее влияние на значение E оказывает объем материала. Снижение объема, занимаемого водой, с 1 л до 0,05 л увеличивает E в сотни раз. Диэлектрические характеристики материалов оказывают меньшее влияние на напряженность электрического поля, чем объем загрузки.

Литература

1. Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering. Editors Harrison Yang, Juming Tang. World Scientific. – 2002. – 172 p.
2. Волгушева Н.В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти // Автореферат канд. дис. Одеса: 2005. – 12 с.
3. Nelson S.O. A System for Measuring Dielectric Properties at Frequencies from 8.2 to 12.4 GHz // J. of Transactions of the ASAE. – 1972. – Vol. 15, No.6. – P. 1094-1098.
4. Nelson S.O. Dielectric Properties Measurement Techniques and Applications // J. of Transactions of the ASAE. – 1999. – Vol. 42, No. 2. – P. 523-529. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications // J. of Res. Agr. ENG. – 2008. – Vol. 54, No. 2. – P. 102-112.
5. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на СВЧ. – М.: Физматиздат. – 1973. – 403 с.
6. Бошкова И.Л., Т.Ю. Дементьева, Е.В Георгиев, Колобков С.Н Измерение диэлектрических характеристик растительных материалов // Холодильна техніка та технологія. – Одеса: ОНАХТ, 2013. – Вип.2. – С. 28-31.
7. Бошкова И.Л., Волгушева Н.В., Панченко Г.І. Дослідження діелектричних характеристик зернових культур // Наукові праці ОНАПТ, Одеса. – 2009. – вип. 36. – т.1. – С. 83-86.
8. S. O. Nelson. Review of Factors Influencing the Dielectrical Properties of Cereal Grain // J. Cereal Chem. – 1981. – Vol. 58, – no. 6. – Pp. 487-492.
9. П.В. Козлов, В.М. Лелевкин. Микроволновой нагрев и стационарные тепловые состояния керамической пластины. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Вестник КРСУ. – 2006. – Том 6. – № 5. – С. 17-27.

УДК 669.713.7

К ВОПРОСУ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Зувев А.А., канд. техн. наук, доцент, Мелкозеров М.Г., канд. техн. наук, доцент
Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

В теории турбомашин, как компрессорных, так и расширительных, при разработке математических моделей выделяют несколько основных конструктивно-граничных элементов: подводящее и отводящее устройства в корпусе статора; межлопаточный канал рабочего колеса; вспомогательный гидравлический тракт, формируемый зазором между ротором и статором. При определении функциональных взаимосвязей отдельные элементы заключаются в общую модель турбомашин.

In theory, turbomachinery as compressor and expansion, the development of mathematical models of some basic structural and boundary elements: inlet and outlet devices in the stator housing; interscapular channel impeller; auxiliary hydraulic path formed by the gap between the rotor and stator. In determining the functional linkages interrelated individual elements is a general model of the turbomachine.

Ключевые слова: уравнение энергии, толщина потери энергии, коэффициент теплоотдачи.

Для сжимаемых рабочих тел отделить механическую задачу о изменении кинетической энергии потока от тепловой невозможно, учет необратимости и неадиабатности течения в элементах турбомашин требует определения функций для локального напряжения трения и коэффициента теплоотдачи. Полуэмпирические интегральные методы теории пограничного слоя (динамического и температурного) в большей мере рассматривают плоские (двумерные) модели для линейных задач. В турбомашине как основное техническое движение используется вращение ротора, траектории и линии тока потока имеют форму спирали или окружности. Если линии тока искривлены, то, кроме продольного перепада давле-