

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСА ПТИЦЫ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

И.А.Рогов В.Н.Адаменко, В.И.Хлебников КЗ

Сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев обладает рядом достоинств, главные из которых высокая скорость, бесконтактность, равномерность. Последнее не всегда реализуется на практике, если нагревают материалы с потерями, к которым относится мясо птицы. По мере продвижения в глубь продукта энергия затухает, поэтому поверхностные слои нагреваются сильнее, чем внутренние. Этот недостаток затрудняет осуществление эффективного нагрева при непрерывном поточном производстве. Значительно усовершенствовать процесс нагрева можно путем использования соответствующей частоты колебаний электромагнитного поля и правильно выбранной рабочей камеры для нагрева. Для расчета частоты и рабочей камеры необходимо знать диэлектрические свойства нагреваемого продукта и их изменения в процессе нагрева.

В работе приведены результаты исследования диэлектрических свойств мяса птицы. Так как эти свойства существенно изменяются с температурой, содержанием влаги, соли в продукте, проведены исследования для мяса с наибольшим и наименьшим содержанием воды и соли при постоянном влагосодержании в интервале температур 10-80°C. Полученные кривые ограничивают область, в которой располагаются значения диэлектрических свойств мяса птицы при действительном процессе нагрева. В качестве объекта для исследования с наибольшим влагосодержанием выбрано соленое сырое белое куриное мясо, имеющее следующий химический состав, %: вода - 73, белок - 23, жир - 1, зола - 3, в том числе хлористый натрий - 2. В качестве объекта для исследования с наименьшим влагосодержанием выбрано соленое вареное красное куриное мясо с химическим составом, %: вода - 66, белок - 26, жир - 5,5, зола - 2,5, в том числе хлористый натрий - 1,35.

Диэлектрическая проницаемость ϵ' и коэффициент потерь ϵ'' связаны между собой соотношением:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

ϵ' характеризует способность вещества накапливать энергию, ϵ'' характеризует рассеяние энергии в веществе. Известно, что преобразование СВЧ-энергии в тепловую в мясопродуктах осуществляется за счет ионной проводимости и релаксационных колебаний молекул "свободной" воды. В соответствии с этим коэффициент потерь состоит из двух слагаемых:

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_p}{1 + (\omega\tau)^2} \omega\tau + (3,6 \cdot 10^{12}) \frac{\pi\sigma}{\omega} \quad (2)$$

где ϵ_s - статическая диэлектрическая проницаемость;
 ϵ_p - высокочастотная диэлектрическая проницаемость;
 ω - круговая частота, рад/сек.;
 τ - время релаксации, сек.;
 G - удельная проводимость, I/ом-см.

Для краткости (2) перепишем так:

$$\epsilon'' = \epsilon_p'' + \epsilon_n'' \tag{3}$$

где ϵ_p'' - доля коэффициента потерь, обусловленная релаксационными колебаниями молекул воды (релаксационная составляющая);
 ϵ_n'' - доля коэффициента потерь, обусловленная ионной проводимостью (составляющая проводимости).

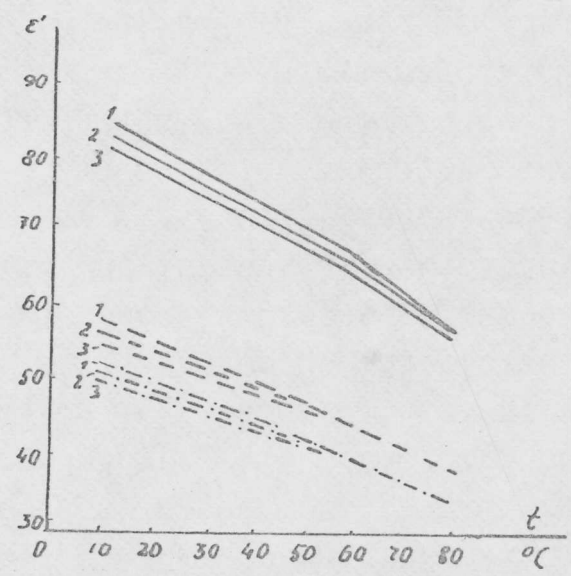


Рис. I. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости воды (сплошные кривые) и куриного мяса (белое - пунктирные кривые; красное - штрих-пунктирные кривые). На частотах, Мгц^х):
 I - 433, 2 - 915, 3 - 2375

На рис. I показаны значения диэлектрической проницаемости для воды и куриного мяса на частотах 433, 915 и 2375 Мгц в интервале температур 10-80⁰С. Характер изменения ϵ' воды и мяса с температурой одинаков. Значение ϵ' мяса определяется, в основном, содержанием воды в нем. Некоторое различие в значениях ϵ' при низких температурах объясняется разной частотной зависимостью воды при низких и более высоких температурах в этом диапазоне ча-

х) На всех рисунках приведены данные для одних и тех же частот, как на рис. I.

стот.

Изменение содержания соли в мясе вызывает незначительное изменение диэлектрической проницаемости его, так как ϵ' соли равна 5,9 и не изменяется с частотой, а с температурой - мало.

Значительно большие изменения с температурой и содержанием соли претерпевает коэффициент потерь.

На рис. 2 приведена зависимость ϵ'' воды от температуры, а также глубина проникновения Δ . Под глубиной проникновения понимают глубину, на которой электромагнитная энергия убывает в e раз, т.е. составляет 36,8% от ее значения на поверхности.

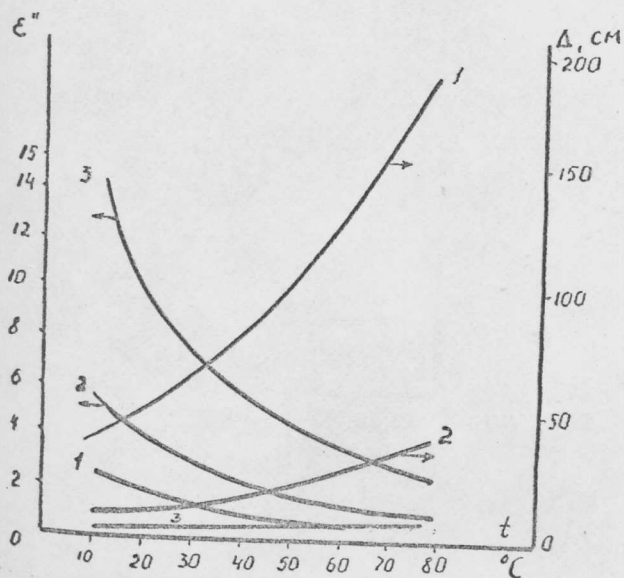


Рис. 2. Температурная зависимость фактора потерь и глубины проникновения для воды

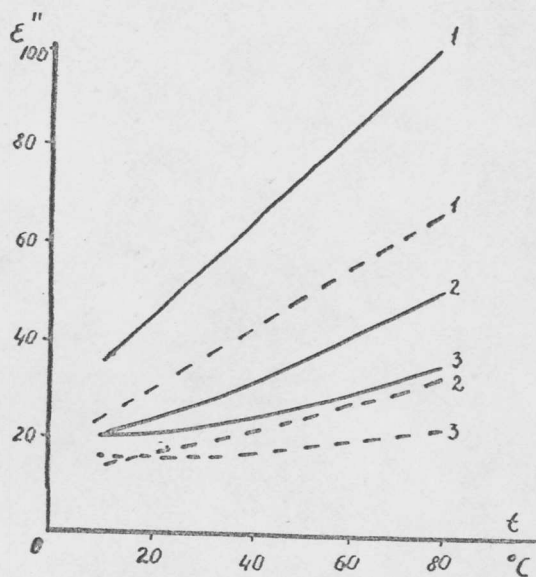


Рис. 3. Температурная зависимость фактора потерь нуриного мяса (белое - сплошные кривые; красное - пунктирные кривые)

На рис. 3 и 4 дана такая же зависимость для мяса. На рис. 2-4 видно, что ход кривых $\epsilon''(t)$, $\Delta(t)$ для воды и мяса имеет противоположный характер. Чтобы объяснить это, рассмотрим зависимость ϵ'' и Δ от содержания соли, а также зависимость ϵ_p'' и ϵ_n'' от тем-

пературы, представленную на рис. 5. Как известно, чистая вода, вследствие ничтожно малой диссоциации, почти не обладает проводимостью, и поэтому в формуле (3) для воды отсутствует слагаемое ϵ_n'' . В мясе содержится соль. Оно представляет собой белково-электролитную систему, для которой в формуле (3) следует учитывать слагаемое ϵ_n'' . При добавлении к мясу соли ϵ'' растет за счет слагаемого ϵ_n'' тем больше, чем больше концентрация соли.

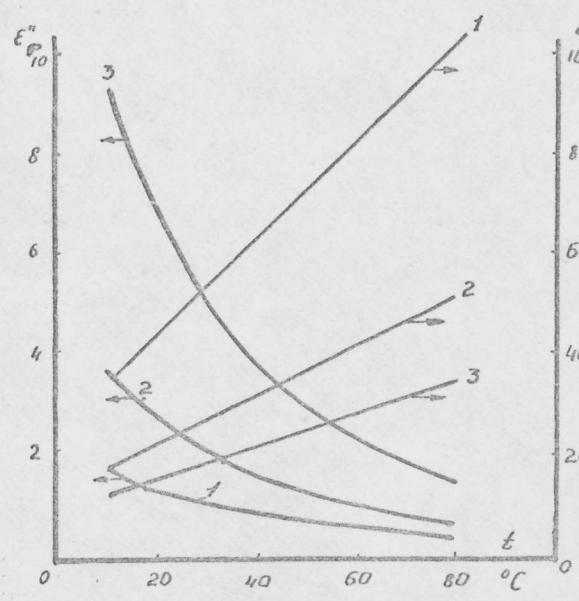


Рис. 4. Температурная зависимость релаксационной составляющей и составляющей проводимости фактора потерь куриного белого мяса

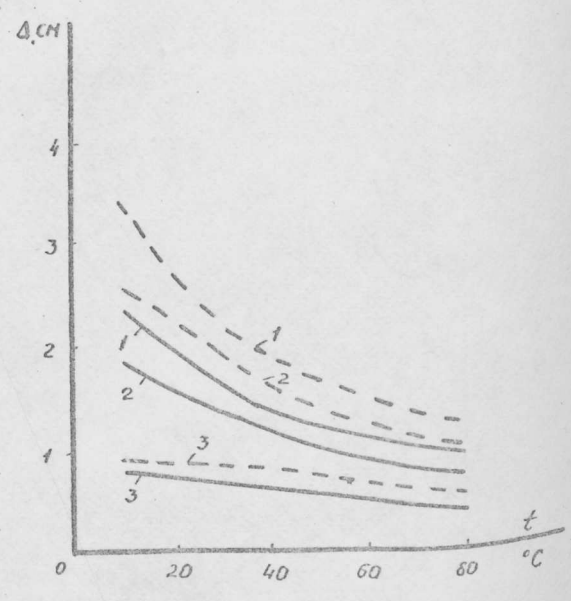


Рис. 5. Температурная зависимость глубины проникновения для куриного мяса: (белое — сплошные кривые; красное — пунктирные кривые)

С ростом температуры релаксационная составляющая уменьшается, а составляющая проводимости растет. Так как при нагреве мяса ионная проводимость на рассматриваемых частотах играет большую роль, чем релаксационные явления, то ϵ'' мяса с ростом температуры увеличивается. Поскольку составляющая ϵ_n'' в формуле (3) для воды отсутствует, то при нагреве ϵ'' воды убывает. На более низких частотах составляющая ϵ_n'' имеет большее значение, что вполне согласуется со вторым слагаемым формулы (2). В соответствии с указанным выше характером изменения ϵ'' с температурой для воды и мяса изменяется

глубина проникновения. Для воды она с повышением температуры увеличивается, для мяса, наоборот, - уменьшается.

Указанные выше частоты выбраны потому, что являются разрешенными для СВЧ электротермии.

Значения ϵ' и ϵ'' мяса и воды, указанные в данной работе, рассчитаны по уравнениям дисперсии Дебая с единым временем релаксации с учетом добавочных диэлектрических потерь в связи с ионной проводимостью по методике, разработанной авторами.

ВЫВОДЫ

Изменение температуры, содержания воды и соли в мясе вызывает существенные колебания диэлектрических свойств его и поэтому должно обязательно учитываться при проектировании процесса СВЧ-нагрева.

При изменениях температуры и концентрации соли в мясе глубина проникновения в большей степени подвержена колебаниям на более низких частотах. Для достижения более равномерного нагрева необходимо обеспечивать одинаковую концентрацию раствора соли в каждой точке продукта.

С увеличением длины волны электромагнитных колебаний наблюдается замедление роста глубины проникновения энергии в мясо.

Длины волн электромагнитных колебаний 915 и 433 МГц возрастают в 2,6 и 5,5 раза по сравнению с длиной волны при частоте 2375 МГц, а увеличение глубины проникновения при этом происходит всего в 1,95 и 2,3 соответственно.

При нагреве мяса птицы более предпочтительны частоты 433 и 915 МГц, обеспечивающие большую равномерность нагрева продукта по объему по сравнению с нагревом на частоте 2375 МГц.

- Fig. 1. Temperature relation of the dielectric permeability of water (solid curves) and chicken meat (white - dotted curves, red - dot-and-dash curves) at: 1 - 433 Mcs, 2 - 915 Mcs, 3 - 2,375 Mcs (these frequencies refer to all the Figures)
- Fig. 2. Temperature relation of the loss factor and the penetration depth for water
- Fig. 3. Temperature relation of the loss factor for chicken meat (white - solid curves, red - dotted curves)
- Fig. 4. Temperature relation of the relaxation component and the conductivity component of the loss factor for chicken white meat
- Fig. 5. Temperature relation of the penetration depth for chicken meat (white - solid curves, red - dotted curves)