

Физика на микровълновите фурни¹

Из историята

Историята на готвенето с микровълни е обвезана с легенди. Тя започва през 1945 г. с едно откритие на Пърси Спенсър – човек, прочут с ненаситното си любопитство по отношение на всичко и герой от Втората световна война, работил по усъвършенстване на радарите. Един ден, работейки с мощен магнетронен генератор в микровълновия диапазон, той почувствал странно усещане, когато минал близо до магнетрона и забелязал, че блокчето шоколад в джоба му се е стопило. Слез това той направил няколко бързи опита с царевица за пуканки и демонстрирал готварските ефекти на микровълните. На следващия ден Спенсър решил да сложи до изхода на магнетрона едно яйце. В един отчет се казва, че “той и колегите му наблюдавали как яйцето започва да трепти и да се тресе. Един по-любопитен от тях се приближил, за да види по-добре какво става, и точно тогава яйцето експлодирало, пръскайки горещ жълтък по неговото очудено лице.”

Година по-късно компанията, в която работел Спенсър, показала модел на микровълнова фурна. Първите търговски модели били с размер на хладилник, стрували между 2000 \$ и 3000 \$ и магнетронът им се охлажда с течаща вода. Съвременните по-малки, по-безопасни, по-надеждни и по евтини (на цена под 500 \$) модели с въздушно охлаждане на магнетрона се появяват едва през 1967 г.

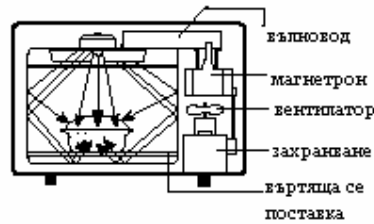
Днес, освен за приготвяне на храна, микровълновите фурни се използват в много и различни производства – за пастьоризация на зеленчуци, сушене при производство на хартия и текстил, за топлинна обработка на фармацевтични продукти, за вулканизация на каучук и еластомери и т. н.

Физика на микровълновата фурна

Както е известно, диапазонът на микровълните включва електромагнитни вълни с честоти от 300 MHz ($\lambda = 1 \text{ m}$) до 300 GHz ($\lambda = 1 \text{ mm}$). Домашните микровълнови фурни работят на честоти около 2,45 GHz, т. е. $\lambda = 12,23 \text{ cm}$. Вълните се генерират от магнетрон и по вълновод постъпват в камерата, в която ще се поставя храната. Камерата е с форма на паралелепипед и стените ѝ са метални. От вътрешната страна на стъклената вратичка на фурната, както и пред гнездото, в което е поместена осветителната крушка, са поставени метални решетки, чиито отвори са многократно по-малки от дължината на вълната, така че камерата фактически представлява един Фарадеев кафез. В повечето микровълнови фурни храната се поставя върху въртяща се поставка, а по-скъпите модели са снабдени и с въртящ се рефлектор, разположен на тавана на камерата.

Попадащите върху металните стени микровълни се отразяват от тях така, както светлината се отразява от огледало. Дълбочината на проникване на вълните с дължина $\lambda = 12,23 \text{ cm}$ в алуминий, например, е само $1,2 \mu\text{m}$.

¹ Предлаганият материал е компилация от съкратени преводи на две статии, публикувани в януарската книжка на Physics Education – статията на М. Фолмер “Физика на микровълновата фурна” и написаната съвместно с редактора на списанието К. Паркър статия “Лоша храна и добра физика: развитие на домашното готвене с микровълнови фурни”.



Фиг. 1

Попадналите в камерата микровълни се отразяват от стените ѝ и образуват стоящи вълни, в резултат на което полето в камерата се оказва нехомогенно – нула във възлите на вълните и максимално във върховете им. Това би довело до неравномерно нагриване на поставената в камерата храна – появяват се т. нар. “горещи точки”, чието положение с течение на времето се променя, тъй като свойствата на загревания продукт (а заедно с тях и скоростта на вълните в него) се променят с температурата. За да се избегне това се използва въртящата се поставка. При наличие на въртящ се рефлектор пък се променят условията за възникване на стоящи вълни, т. е. в средно (честотата на въртене на рефлектора е неизмеримо по-малка от честотата на вълната) полето в камерата се хомогенизира.

Нагриване на храната в микровълновата фурна

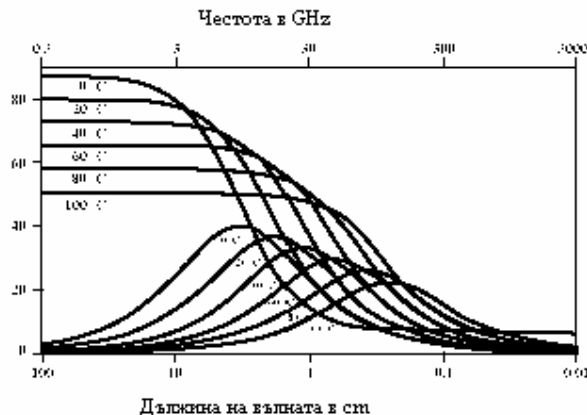
Абсорбция на микровълните от водата. В микровълновите фурни по-голямата част от електромагнитната енергия се поглъща от молекулите на водата, които представляват електрични диполи. При ниски честоти на електричното поле диполите лесно следват промените на полето и тяхната ориентация се променя синхронно (във фаза) с полето. При по-високи честоти инертността на молекулите и взаимодействията им с техните съседи затрудняват преориентацията на диполите и те изостават от променящото се поле. Накрая, при много високи честоти (1 – 10 THz) молекулите не могат повече да реагират на толкова бързи промени на полето. В областта на гигагерцовите честоти изоставането на диполите по фаза спрямо електричното поле е причина за абсорбцията на енергия от полето – явление, известно като диелектрични загуби.

За изясняване на явлението на макроскопично равнище ще припомним, че простопериодичните функции на времето с кръгова честота ω се представят във вида $Ae^{i\omega t}$, където $A = ae^{i\alpha}$ е комплексната амплитуда на функцията, а α – фазовата ѝ константа. С подобна функция се описва например и електричното поле E , и поляризацията P на средата, дължаща се на преориентацията на диполите. Поради изоставането на поляризацията от променящото се поле обаче, фазовата константа на P вече е не α , а друго число. И тъй като електричната индукция D на полето е сбор от $\epsilon_0 E$ и P , а от друга страна $D = \epsilon \epsilon_0 E$, то вече относителната електрична проницаемост ϵ на средата се оказва комплексно число: $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$. Доказва се, че абсорбираната от диелектрика мощност е право пропорционална на имагинерната част ϵ_2 на електричната проницаемост и се описва с формулата:

$$(1) \quad P = \omega \epsilon_0 \epsilon_2 E_{eff}^2 V,$$

където V е обемът на диелектрика, а E_{eff} – ефективната стойност на електричното поле.

Съществен за разбиране на процесите е фактът, че както реалната, така и имагинерната част на електричната проницаемост зависят съществено от кръговата честота ω на полето. Кривите на фиг. 2 представляват графики на зависимостите $\epsilon_1 = \epsilon_1(\omega)$ и $\epsilon_2 = \epsilon_2(\omega)$ за водата при различни температури в интервала $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$.



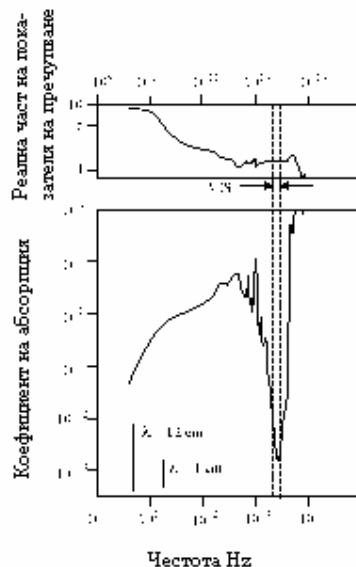
фиг. 2.

От фигурата се вижда например, че при 20°C графиката на ϵ_1 започва при ниските честоти от статичната си стойност около 80, в гигахерцовия диапазон намалява и при оптически честоти става равно на около 1,78. Този факт обяснява и защо показателят на пречупване на водата е приблизително 1,33. Наистина, като вземем предвид формулата на Максвел и факта че магнитната проницаемост на водата е приблизително μ_0 , за показателя на пречупването ѝ получаваме:

$$(2) \quad n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu_0}}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{1,78} \approx 1,33.$$

От същите графики се вижда, че ϵ_2 , от което зависи ефективното преобразуване на електромагнитната енергия във вътрешна енергия (т. е. повишението на температурата) има добре изразен максимум за честоти около 20 GHz. Доколкото обикновено храната се загрява от стайна температура (около 20°C) до 100°C , от фиг. 2 би следвало да се заключи, че честотата в микровълновите фурни би следвало да бъде между 20 и 100 GHz. Всъщност честотата се определя от съвсем друг критерий.

Дълбочина на проникването на микровълните във водата. На фиг. 3 са показани графиките на зависимостта на реалната част на показателя на пречупване и на коефициента на абсорпция α на водата в зависимост от честотата за честоти от микровълновия диапазон (0,1 GHz) до областта на ултравиолетовите лъчи (10^{16} Hz). Вижда се, че коефициентът на абсорпция на водата расте значително чак до инфрачервената област, където стойностите му могат да достигнат до $\alpha > 10^3 \text{ cm}^{-1}$. Тъй като дълбочината на проникване δ , т. е.



фиг. 3.

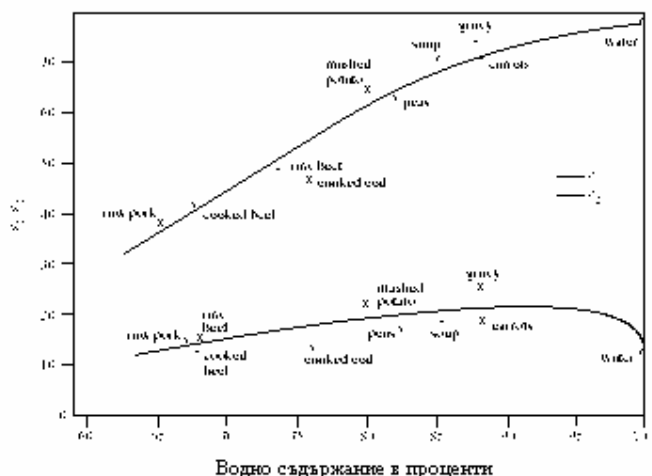
разстоянието, на което полето на вълната намалява $e = 2,7182\dots$ пъти, е обратно пропорционална на α , това означава, че енергията на полето се поглъща в един слой, не по-дебел от 10^{-3} cm, т. е. от порядъка на $10 \mu\text{m}$. (От графиката се вижда още, че между вибрационните възбуждения в инфрачервената област и електронните възбуждения в ултравиолетовата област коефициентът на абсорпция на водата има дълбок максимум, където $\alpha < 10^{-3}$ cm, което означава, че за видимата светлина дълбочината на проникване е от порядъка на 10^3 cm, т. е. около 10 m – факт, който обяснява прозрачността на водата.

Видът на графиката на α обяснява защо микровълновите фурни не работят на честоти в диапазона 20 – 100 GHz, където според фиг. 2 преобразуването на енергията е най-ефективно. Наистина, размерите на храната, която искаме да обработим топлинно във фурната, са от порядъка на сантиметри. Ако я облъчим с вълни от този диапазон, ще се загрее само един тънък слой с дебелина от порядъка на само няколко μm , който поради малката топлопроводност на храната ще прегори, а вътрешността ѝ ще остане сурова. Изборът на по-ниската работна честота от 2,45 GHz осигурява по-равномерно нагриване на храната в целия ѝ обем.

Често задавани въпроси

Зависи ли скоростта на нагриване от вида на храната? Казаното по-горе се отнася до чиста вода. Разбира се, водата е основният фактор, от който зависи загриването на храната. Ако обаче храната съдържа например сол, натриевите и хлорните йони също взаимодействат с вълните. Приетата от тях енергия йоните предават чрез удари на съседите си и по такъв начин ускоряват загриването.

Зависимостта на имагинерната част на електричната проницаемост на различни храни от процентното съдържание на вода в тях, а от там и ефективността на загриването, може да се оцени от вида на долната крива на фиг. 4.



фиг. 4.

Може ли лед да се топи в микровълнова фурна? За честота 2,45 GHz имагинерната част на електричната проникваемост на леда е три до четири порядъка по-малка, отколкото на течната вода и в съответствие с формула (1) толкова пъти по-слаб е и ефектът на нагряване. Това се дължи на факта, че водните молекули в леда имат фиксирани положения и връзките със съседите им затрудняват диполите да следват промените на полето. Ето защо за загреване на леден къс с 1 °C е необходимо много повече време, отколкото за такова повишение на температурата на същото количество вода.

Въпреки това размразяването на лед във фурната е много по-бързо, отколкото ако бъде оставен при стайна температура. За целта микровълновата фурна работи в особен режим – тя периодично се включва за кратко време, след което се изключва за по-дълъг интервал и т. н.. Ако случайно на определено място част от леда се разтопи, когато фурната се включи, получената при топенето вода ще се загрее значително. По времето, когато фурната е изключена, приетото от водата количество топлина чрез топлопроводност се предава на околния лед, стопява нова част от него, при следващото включване вече се нагрява повече вода и т. н.

Могат ли микровълните да излезят от фурната? Както бе отбелязано, за микровълните микровълновата фурна представлява Фарадеев кафез, така че практически те не могат да я напуснат. За повечето фурни равнището на радиация до повърхността им е около 1 % от допустимата граница от 5 mV/cm². С отдалечаване от фурната интензитетът на радиацията бързо намалява, така че обикновено радиационната доза е далеч под 1/1000 от максималната допустима доза.

Тъй като повечето модели микровълнови фурни имат бутон, който едновременно изключва генерирането на вълните и отваря вратичката, може да възникне подозрението, че при натискане на този бутон навън може да излезе опасна радиация. За да се оцени тази опасност трябва да се има предвид, че затихването на полето на вълните след изключване на магнетрона става по експоненциален закон:

$$(3) \quad E(t) = E(0) \exp(-\omega t / Q),$$

където Q е коефициентът на доброкачественост на фурната. За празна фурна той е от порядъка на 10^4 , което гарантира, че полето намалява 1000 пъти за по-малко

от 4,5 μs . Наличието на храна във фурната намалява коефициента на доброкачественост поне сто пъти, така че времето за 1000-кратното затихване намалява до 45 ns. Очевидно е, че никой не е в състояние да отворе вратичката толкова бързо.

Възможно ли е микровълните да променят химическия състав на храната? Някои хора допускат, че обработената в микровълнова фурна храна не е здравословна, тъй като облъчването ѝ с микровълни предизвиква в нея химични реакции. За да предизвикат химични реакции, обаче, квантите на микровълните трябва да притежават енергия от порядъка на 1 eV. Всъщност тяхната енергия е само 10^{-5} eV. Освен това може да се пресметне, че броят на фотоните в една обикновена микровълнова фурна е на порядъци по-малък от необходимия, за да протече много фотонна дисоциация или йонизация. Следователно загряването на храна в микровълнова фурна не променя химичния ѝ състав.