



Андрій Варламов
доктор фіз.-мат. наук,
науковий директор
Інституту надпровідників,
оксидів та інших інноваційних
матеріалів та пристроїв
Національної науково-дослідної
ради Італії (SPIN CNR),
м. Рим, Італія



Андреас Глатц
доктор теоретичної фізики,
професор Північного Іллінойського
університету, США



Серджіо Грассо
доктор філософії, антрополог,
журналіст, письменник,
м. Рим, Італія

Фізика приготування смачної піци

Історія піци переповнена казками, легендами і анекдотами. Винахідниками цього простого, смачного й «універсального» коржа вважаються італійці. Попередниками піци є прісні коржі, які в епоху неоліту були винайдені незалежно на різних територіях від Китаю аж до обох Америк та вироблялися з борошна, отриманого з кормового зерна (пшениці, ячменю, емеру) і випікалися на розпеченому на вогнищі камінні.

Італійське слово «піца» вперше зустрічається в латинському пергаментному рукописі (Codex Diplomaticus Sajtanus), в якому наводиться список пожертв єпископу Гети (Неаполь). У документі, який датується 997 роком н.е., зазначена поставка дванадцяти піц («*duodecim pizze*») щорічно на день Різдва і у Великодню неділю.

Етимологи сперечаються щодо походження слова «піца»: чи пішло воно від візантійського варіанту грецької мови – *πίτα* = хліб, тістечко, пиріг, хлібний корж (засвідчено у 1108 році); чи від грецького *πιϋκτῆ* = затверділий; чи від латинського *picta*=розмальований, прикрашений, чи від *pinsere* = розкатаний, розтягнутий.

Починаючи з VIII ст. до н.е., грецькі поселенці з південної Італії (сам Неаполь був заснований близько 600 року до н.е. як грецьке місто) випікали «плакунтос» (*Plakuntos*) – плоский хліб із зернового тіста на основі опари, покритий сумішшю олії, часнику, цибулі, трав, інколи додавалося подрібнене м'ясо або маленька рибка. Хліб був майже таким як сучасна турецька піде. Давньогрецький мислитель *Платон* згадував «пиріжки», виготовлені з тіста з ячмінного борошна з начинкою з олив і сиру.

Греки познайомили все Середземномор'я з двома єгипетськими процедурами: заквашуванням і замішуванням тіста для отримання більш легко перетравлюваного хліба та використанням куполоподібних печей замість відкритого вогню. Грецькі пекарі, які стали популярними в Римі в 4-му сторіччі до н.е., перетворили приправлений і гарнірований «плакунтос» на латинську «плаценту» (*Placenta*) =плоский хліб.

Римський поет **Вергілій** (рис. 1) писав:

Their homely fare dispatch'd, the hungry band
Invade their trenchers next, and soon devour,
To mend the scanty meal, their cakes of flour.
Ascanius this observ'd, and smiling said:
“See, we devour the plates on which we fed”

(The Works of Virgil, vol. 3, London, printed by W. Blackader, 1803)

Коли домашній наїдок готовий, голодний гурт
Накидається на нього і швидко поїдає з дерев'яних тарілок.
А щоб поліпшити убогу їжу, коржі готують з борошна.
Асканій це спостеріг і, посміхаючись, сказав:
“Дивись, ми споживаємо тарілки, з яких їли”.

(вільний переклад – Є. Рябченко)

Безперечно, що більше двадцяти століть тому греки і римляни створили прототипи піци, але саме неаполітанці додали в неї інгредієнти, які загальновізнано асоціюються з піцою в наш час – томати і сир моцарела (рис. 2).



**Рис. 1. Бюст
Вергілія
з надгробку в
Неаполі, Італія**



Рис. 2. Моцарела ді Буфала і помідори чері



Рис. 4. Піца «Марінара»

Неаполітанці познайомилися з екзотичною рослиною томат завдяки *Колумбу*, але овоч вважався отруйним. Томати, які ризикували їсти в основному селяни, вперше згадуються в книзі рецептів «Il Cuoco Galante» («Приготування вишуканих страв»), написаній шеф-кухарем *Вінцентто Коррадо* у 1819 р., а про «моцарелу» – у книзі рецептів «Орега» автора *Бартоломео Скаппі* (1570 р.). Аж до сьогодні справжня моцарела все ще виготовляється з жирного молока буйволів поблизу Неаполя (рис.3). Це дуже делікатний продукт не лише за смаком, але й завдяки з проблемою його зберігання – моцарела не виносить низької температури: якщо її зберігати в холодильнику, вона стає резиноподібною. Її слід зберігати тільки у власній сироватці при кімнатній температурі впродовж кількох днів.

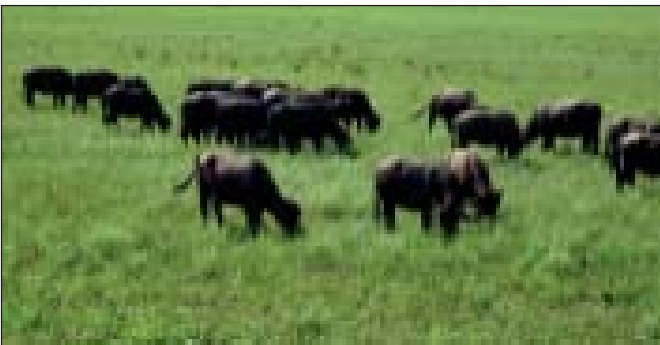


Рис. 3. Ферма для буйволів поблизу Неаполя, Італія

З документів випливає, що до XVIII ст. неаполітанська піца була простою стравою із запеченої чи підсмаженої локшини приправленої салом, бринзою, оливками, сіллю або маленькою рибкою *cecinielli*. Упродовж XIX–XX сторіччя виробники піци («*pizzaioli*» – піцайоло) заповнили вулиці Неаполя, продаючи за копійки випечені чи підсмажені піци, политі томатним соусом і приправлені листям базиліку. В 1889 р., через декілька років після об'єднання Італії, виробник піци *Рафаело Еспозіто* вирішив висловити повагу до королеви Італії, додавши моцарелу до традиційного пирога з томатами і базиліком. Комбінація з червоного, білого і зеленого символізувала кольори італійського прапора, а триколірна піца, з того часу відома як піца «*Маргарита*» (*Pizza Margherita*), принесла нехитрому пирогові такий успіх, який прості виробники піци ніколи навіть уявити не могли (рис. 5).

У сучасній Італії існують різноманітні регіональні способи виготовлення піци. Неаполітанці знамениті своїми круглими піцями з високим хрустким обідком – *cornicione*.

Окрім згадуваної піци «*Маргарита*» стандартною є піца «*Наполетана*» (*Pizza Napoletana*, визнана в ЄС як *Guaranteed Traditional Speciality*), приправлена помідорами, моцарелою та анчоусами. Найпростіша версія піци називається «*Марінара*» (*Marinara*), яка просто притрушена помідорами, часником, майораном й присмачена олією (рис. 4). Вишуканою і багатого є піца «*Кальцоне*» (*Calzone*) – круг із тіста, складений навпіл, заповнюється рикотою, моцарелою, салями або прошуто.

Римляни, які віддають перевагу хрустким коржам, додають до борошна більше води (до 70 %), а до тіста підмішують оливкову олію або смалець, тому їхню піцу можна розкатати на товщину полотна. Приправи ті ж, що й для піци «*Наполітани*», але до піци, яку подають в римській піцерії, не кладуть корнюшонів *cornicione*. У римських пекарнях і бакалійних магазинах звичайно продають піцу «*б'янка*» (*pizza bianca*) на вагу, «*білу*» – прямокутну, тверду піцу, тільки присмачену олією і присипану сіллю. Піца «*Сарданейра*» (*Sardenaira*) – корж із помідорами, оливками і анчоусами – типова для Лігурії, але походить з місцевості поблизу Провансу, де вона називається «*pissaladiere*» (від назви *anchovy paste pissalat* – солена риба).

Типовою для регіону Абрुцці є піца *Pizza di Sfrigoli*, зроблена з добре вимішаного тіста з борошна, свинячого жиру і солі, до якого перед випіканням додаються невеликі шматочки свинини (*sfrigole*), тоді як в Апулії улюбленою є *Pizza Pugliese*, тонка вкрита томатним соусом і великою кількістю тушкованої цибулі (анчоуси і оливки необов'язкові). Іншою цікавинкою в Апулії є маленька піца-кишенька «*Панзерото*» (*Panzerotto*), яка використовується для відзначення початку Масниці. Панзерото відрізняється від неаполітанської кальцони (*calzone*) як за розміром, так і за способом приготування (вона смажиться, а не печеться). Класичною начинкою є томатний соус і свіжа моцарела, але існує багато її варіантів.

Калабрійці, які люблять гострі, пряні смаки, додають до своїх піц пікантну салями (*soppresata*) або *'nduja*, пастоподібну пекучу суміш смальцю і перцю чілі, ймовірно завезену до Калабрії іспанцями.

Сицилійська версія піци називається «*sfinciuni*» (від латинського слова *spongia* – губка). Це прямокутний товстий пухкий корж, щедро приправлений оливковою олією, цибулею, овечим сиром і в'яленими помідорами. Піца «*scaccia*» характерна для сицилійської провінції Рагуса (*Ragusa*). Це – тонко розкатане тісто, змащене томатним соусом з сиром, згорнуте у вигляді струдія. Потім довгі прямокутні піци розрізаються на шматочки, що являють собою шари хлібної скоринки, соусу і сиру.

Піца «Панада» (Pizza Panada) з Сардинії – поживна, наповнена баклажанами, бараниною і помідорами чи морепродуктами – рибою або жирним місцевим вугром.

Будучи по суті «відкритим сендвічем», неаполітанська піца появилася в США наприкінці XIX – на початку XX століття, коли італійські емігранти, як і мільйони інших європейців, почали переїжджати до Нью-Йорка, Трентона, Нью-Хейвена, Бостона, Чикаго та Сент-Луїса. Аромати нехитромудрих піц, які продавалися на вулицях неаполітанськими піцайоло, зацікавили американців. Неаполітанський емігрант *Антоніо Перо (Antonio Pero)* почав виготовляти піцу для продуктового магазину Ломбарді, який і досі існує в маленькій Італії Нью-Йорка, а в 1905 році містер *Дженаро* отримав ліцензію на відкриття першої піцерії на Спрінг Стріт в Манхетені.

Під впливом італійських іммігрантів на американську культуру в США виникли свої регіональні типи піц. Деякі з них тільки віддалено схожі на італійський оригінал. Чикаго має свій власний стиль приготування піци в глибокій формі. Детройт також має свій унікальний спосіб повторного випікання піци з сиром, який цілком покриває її скоринку. Також добре відома і нью-йоркська тонка піца. У Сент-Луїсі, шт. Міссурі, використовують тонкі хрусткі коржі і прямокутні шматочки для своїх місцевих піц, тоді як у Нью-Хейвені до тонкої хрусткої піци не кладуть сиру, хіба що клієнт попросить його як додаткову добавку.



Рис. 5. Піцайоло в одній із римських піцерій з піччю на дровах

Будучи допитливими науковцями, ми почали вивчати секрети приготування піци. Правило номер один, як нам сказали італійці: необхідно завжди шукати піцерію з піччю на дровах (а не електричну). Гарні піцерії пишуться своїми «*forno*» («*піч*» італійською), у якій відвідувач власними очима може спостерігати весь процес випікання. Піцайоло формує диск із тіста, викладає на нього начинку, кладе сиру піцу на дерев'яну чи алюмінієву лопату, і нарешті переміщає її до печі. Через пару хвилини по тому вона лежить перед клієнтом, вкрита апетитними бульбашками сиру, заохочуючи з'їсти її і запити дзбаном хорошого пива (рис. 5). Ми отримали корисну пораду від друга піцайоло з римської піцерії, яку часто відвідували, коли проживали неподалік: «Завжди приходьте поїсти піцу або до 20.00,

або після 22.00, коли піцерія напівпорожня». Порада була підтверджена ще одним частим відвідувачем піцерії – великим сірим котом. Якби піцерія була переповненою, кіт пішов би геть і не проявив би жодного інтересу до того, що знаходилося на тарілках відвідувачів.

Причина для цієї поради була дуже проста – місткість печі. Як пояснив піцайоло, 325–330°C є оптимальною температурою¹ для випікання римської піци на дровах у печі з днищем, викладеним вогнетривкою цеглою. За таких умов тонка римська піца буде готова через 2 хвилини. Тому навіть випікаючи в печі дві піци одночасно, піцайоло може обслужити 50–60 клієнтів за годину. У час пік близько сотні покупців відвідують піцерію і щонайменше десять клієнтів очікують на свіжовипечену піцу. Щоб задовольнити попит, піцайоло збільшує температуру в печі до 390°C і піци «вилітають» з печі кожні 50 с (отже, «час випікання» кожної з них дорівнює приблизно півтори хвилини). Проте, їхня якість гірша: низ і шкірка трохи «перепечені» (злегка темні), а помідори трохи недоварені.

Оскільки не завжди легко знайти піцерію з цегляною піччю, давайте поглянемо, які переваги вона має у порівнянні з електричною духовкою і чи існує спосіб покращити останню, щоб готувати пристойну піцу.

Щоб продемонструвати фізичні процеси, які задіяні при випіканні піци, розглянемо загальний випадок передачі тепла. Уявіть себе дитиною, у якої лихоманка, а термометра під рукою немає. Ваша мама поклала б руку на ваше чоло і відразу ж сказала б: «у тебе висока температура, завтра до школи не йди». Щоб науково дослідити цей процес, ми спростимо задачу. Уявімо, що ваша матуся торкається вашого чола не рукою, а своїм чолом. У цьому випадку, якщо температура вашого лоба була б 38°C, а мамино 36°C, ясно з симетричності задачі, що температура в області контакту (T_0) між двома лобами буде 37°C, і що ваша мама відчула б потік тепла від вашого чола (реальний розподіл температур з часом показано на рис. 6).

Тепер припустимо, що голова вашої матері зроблена зі сталі, а її температура така ж сама, 36°C. Інтуїтивно зрозуміло, що температура в області контакту зменшиться, скажімо, до 36,3°C. Це пов'язано з тим фактом, що сталь відводить тепло від області контакту до свого об'єму ефективніше, оскільки її теплопровідність велика. Також зрозуміло, що це перенесення стає більш ефективним, коли потрібно відвести меншу кількість тепла від області контакту (тобто перенесення тепла посилюється, коли специфічна теплопровідність матеріалу «материнського чола» зменшується, рис. 7).

А тепер проаналізуємо процес випікання більш науково. Спочатку нагадаємо читачеві основні поняття про перенесення тепла. Коли ми говоримо про «тепло», ми зазвичай маємо на увазі частину енергії системи (такої, як голова матері, піч чи сама піца), пов'язану з хаотичним рухом атомів, молекул та інших часток, з яких вона складається. Ми успадкували це уявлення про тепло з фізики минулої епохи. Фізики стверджують, що тепло не є функцією стану системи, його кількість залежить від способу набуття цього стану системою.

¹ Очевидно, температура залежить від способу приготування і зберігання тіста. Піцайоло *Антоніо* готує тісто заздалегідь – за 24 години до випікання піци. Змішавши усі інгредієнти і добре їх вимісивши, він залишає тісто на декілька годин «відпочити», а потім розрізає його на шматки і формує порції округлої форми. Для неапольської піци порція важить 180–250 г, для римської – менше. Ці порції використовуються для одинарної піци. Потім він кладе ці колобки з тіста в дерев'яні ящики, де тісто підходить впродовж 4–6 годин. Після цього воно готове для випікання або зберігання в холодильнику для подальшого використання.

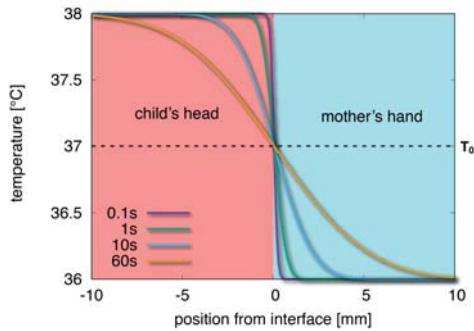


Рис. 6. Температурний профіль між головами матері і дитини після їхнього контакту упродовж 0.1с, 1с, 10 с і 60 с

Рис. 7. Те ж саме, що й на рис. 6, тільки з холоднішою сталеву «головою»

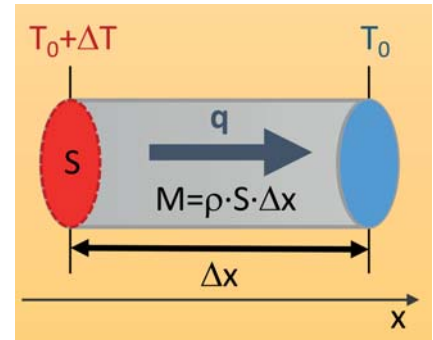
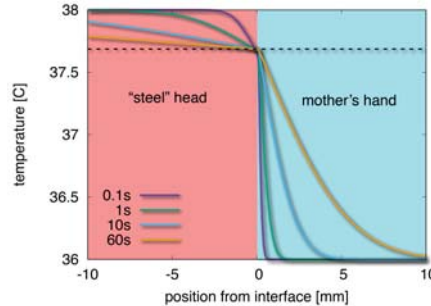


Рис. 8. Тепловий потік в малому циліндрі від гарячого ($T_0 + \Delta T$) до холодного (T_0); температура зменшується зліва направо

Як і робота, тепло – не спеціальний тип енергії, а скоріше, величина, зручна для описання переносу енергії. Кількість тепла, необхідна для збільшення температури одиниці маси матеріалу на один градус, називається *питомою теплоємністю* матеріалу:

$$c = \frac{\Delta Q}{M \Delta T}. \quad (1)$$

Тут M – маса системи, а ΔQ – кількість тепла, необхідна для нагрівання системи на температуру ΔT . З цього виразу зрозуміло, що питома теплоємність вимірюється в одиницях СІ як $\text{Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{K}^{-1}$.

У випадку теплового контакту між двома системами з різною температурою тепло переходить від теплішої системи до холоднішої. Густина теплового потоку q є кількістю тепла ΔQ , яке проходить через одиницю площі за одиницю часу у напрямку зміни температури:

$$q = \frac{\Delta Q}{S \Delta t}. \quad (2)$$

Для найпростішого випадку нерівномірного нагрівання однорідної системи, використовуючи рівняння (1), знаходимо:

$$q = \frac{cM\Delta T}{S\Delta t} = c\rho \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) = -\kappa \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

де ρ – густина маси². Припустивши, що Δx мале, визначимо величину у великих дужках як похідну температури за координатою x , врахувавши те, що температура зменшується уздовж осі x (рис. 8). У загальному випадку, q є вектором і похідну в рівнянні (3) замінюємо на градієнт ΔT , який описує показник зміни температури у просторі. Коефіцієнт κ в рівнянні (3) є *теплопровідністю* й описує здатність матеріалу передавати тепло, якщо до нього прикладений тепловий градієнт³. Рівняння (3) є математичним виразом так званого закону Фур'є, який дійсний при малих варіаціях температури.

Відтак проаналізуємо яким чином «температурний фронт» проникає від поверхні середовища в середину, коли до нього підведено тепловий потік (рис. 8). Припустимо, що впродовж часу t температура в невеликому циліндрі з висотою $L(t)$ і поперечним перерізом S змінюється на величину ΔT .⁴

Перепишемо рівняння (3), замінивши Δx на $L(t)$:

$$\frac{c\rho L(t) \Delta T}{t} = \kappa \frac{\Delta T}{L(t)}. \quad (4)$$

Розв'язавши рівняння (4), отримуємо довжину $L(t)$:

$$L(t) \sim \sqrt{\frac{\kappa t}{c\rho}} = \sqrt{\chi t}, \quad (5)$$

тобто, температурний фронт розповсюджується в середовищі пропорційно квадратному кореню від часу. Час, через який температура на глибині L досягне значення, близького до величини температури на поверхні контакту, залежить від значення κ , c і ρ . Параметр $\chi = \kappa / c\rho$ називають *коефіцієнтом теплової дифузії* або *коефіцієнтом температуропровідності*, а час нагрівання усього об'єму можна представити виразом $\tau \sim L^2 / \chi$.

Безумовно, наш розгляд задачі проникнення тепла в середовище є простою оцінкою величини $L(t)$. Більш точний підхід потребує розв'язання диференціальних рівнянь. Проте, кінцевий результат підтверджує наші висновки (5), уточнені числовим коефіцієнтом:

$$L(t) = \sqrt{\pi \chi t}. \quad (6)$$

Тепер, коли ми знаємо як працює теплопровідність, повернемося до проблеми обчислення температури зони взаємодії між двома півпросторами: зліва з параметрами κ_1 , c_1 , ρ_1 і температурою T_1 на $-\infty$ та справа з параметрами κ_2 , c_2 , ρ_2 і температурою T_2 на $+\infty$. Позначимо температуру на границі як T_0 . Рівняння енергетичного балансу, тобто вимога рівності кількості тепла, яке переходить з теплового правого півпростору через поверхню взаємодії до холодного лівого півпростору, можна записати формулою:

$$q = \kappa_1 \frac{T_1 - T_0}{\sqrt{\pi \chi_1 t}} = \kappa_2 \frac{T_0 - T_2}{\sqrt{\pi \chi_2 t}}. \quad (7)$$

Тут ми спрощуємо рівняння, припускаючи, що всі зміни температури відбуваються на відповідній довжині (6). Розв'язавши це рівняння відносно T_0 , знаходимо:

$$T_0 = \frac{T_1 + \nu_{21} T_2}{1 + \nu_{21}}, \quad (8)$$

де:

$$\nu_{21} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \sqrt{\frac{\chi_1}{\chi_2}} = \sqrt{\frac{\kappa_2 c_2 \rho_2}{\kappa_1 c_1 \rho_1}} \quad (9)$$

¹ Можна також використовувати цю формулу для простого обчислення втрат тепла через стіни будинку впродовж холодної зими. У цьому стаціонарному випадку розподіл температури не змінюватиметься з часом.

² Визначення теплопровідності $\kappa = c\rho (\Delta x)^2 / \Delta t$, використане в рівнянні (3), потребує уточнення. Хоча наше спрощене диференціювання передбачає геометричну залежність, потрібно наголосити, що в реальності воно визначається тільки мікроскопічними властивостями матеріалу.

³ Це вже не стаціонарний процес, а потік q не постійний, оскільки тепло частково буде йти на нагрівання матеріалу циліндра. Тому, на відміну від стаціонарного процесу, швидкість зміни температури dT/dx в середовищі є функцією відстані і часу.

Властивості	Теплоємність c [Дж/(кг×К)]	Теплопровідність κ [Вт/(м×К)]	Масова густина ρ [кг/м ³]	Температурна провідність χ [м ² /с]	ν_{21}^5
Матеріал					
тісто ⁶	2-2.5×10 ³	0.5	0.6-0.8×10 ³	2.5-4.2×10 ⁻⁷	1
харчова сталь	4.96×10 ²	18	7.9×10 ³	4.5×10 ⁻⁶	0.1
вогнетривка цегла	8.8×10 ²	0.86	2.5×10 ³	4.0×10 ⁻⁷	0.65
вода (@25°C)	4.2×10 ³	0.58	1.0×10 ³	1.4×10 ⁻⁷	0.2

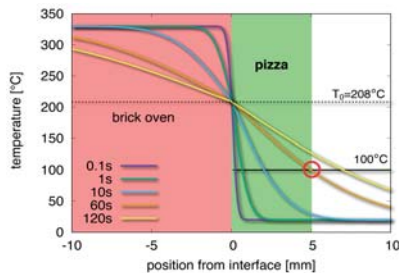


Рис. 9. Температурний профіль цегляної печі з піцою у різні моменти. На 60-й секунді температура верху піци досягає 100°C (червоний кружок). Тут враховується тільки теплова дифузія, випаровування і радіація не розглядаються

Потрібно зазначити, що час не входить до рівняння (8) (тобто температура на поверхні розділа залишається постійною в процесі теплообміну, див. рис. 6, 7 і 9). Для однакових матеріалів із різними температурами можна легко визначити: $T=(T_1+T_2)/2$. Це числовий доказ того інтуїтивного висновку, який ми зробили на початку статті для температури 37°C при взаємодії руки матері і чола дитини. Якби рука матері була зроблена зі сталі, $\nu_{21} \gg 1$ і $T_0 \approx T_2$, її температура залишилася б майже незмінною після контакту з гарячим чолом, це означало б, що мати не змогла б відчутти лихоманки в дитини.

Нарешті ми готові обговорити переваги цегляної печі. Почнемо з обчислення температури в зоні взаємодії між піцою, яка посаджена в цегляну піч, і розігрітою робочою поверхнею останньої. Усі необхідні параметри представлені в таблиці на цій сторінці.

Прийнявши початкову температуру піци рівною $T_0^{do}=20^\circ\text{C}$, а температуру всередині печі, як стверджував наш піцайоло, приблизно рівною $T_1^{wo}=330^\circ\text{C}$, знаходимо температуру на границі між поверхнею печі і низом піци

$$T_0^{wo} = \frac{330^\circ\text{C} + 0.65 \cdot 20^\circ\text{C}}{1.65} \approx 208^\circ\text{C}.$$

Як нам відомо зі слів того ж піцайоло, за таких умов піца ідеально випікається за дві хвилини. Повторимо тепер наші обчислення для електричної духовки зі сталеву поверхнею для випікання. Для електричної духовки коефіцієнт $\nu_{eo} = 0.1$ і якщо її розігріти до тієї самої температури 330°C, то температура знизу піци дорівнюватиме

$$\frac{330^\circ\text{C} + 0.1 \cdot 20^\circ\text{C}}{1.1} \approx 300^\circ\text{C}.$$

Це занадто багато! Піца просто перетвориться на вугілля! Температура взаємодії навіть набагато вища, ніж у неаполітанських піцеріях, де звичною температура печі є 400–450°C.

Гаразд, сформулюємо задачу по-іншому. Припустимо, що ті виробники піци, які використовували дерев'яні лопати для посадки піци в піч, праві: температура на поверхні розділа (римської) піци має бути 210°C. Яка тоді необхідна температура в електричній духовці зі сталеву поверхнею для випікання?

Відповідь отримаємо, розв'язавши відносно T_1^{eo} рівняння (8) з коефіцієнтом $\nu_{eo} = 0.1$, за умови, що температура знизу піци така ж, як і в печі на дровах: $T_0^{eo}=T_0^{wo}$. Розв'язок цього рівняння свідчить, що електрична піч має бути значно холоднішою за цегляну: $T_1^{eo} \approx 230^\circ\text{C}$.

Здається, якщо ти в змозі забути пахощі палаючих дров, потріскування сухого повітря у цегляній печі та інші натуральні деталі, проблема була б вирішена – нагріємо електричну піч до 230°C і через пару хвилин можемо витягати чудову піцу. Але: чи це так легко?

Щоб відповісти на це запитання, спершу необхідно розглянути другий важливий механізм переносу тепла: *теплове випромінювання*. Його інтенсивність, кількість енергії випромінювання, яка надходить щосекунди до 1 см² поверхні печі, визначається законом Стефана–Больцмана:

$$I = \sigma T^4,$$

де $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/м²К⁴) це так звана константа Стефана-Больцмана

Типова цегляна піч має подвійне склепіння заповнене піском, яке підтримує майже постійну температуру. Її стіни і нижня частина також нагріваються до $T_1^{wo} = 330^\circ\text{C}$ (= 603K). Це означає, що весь об'єм печі “заповнений” інфрачервоним випромінюванням. При високій температурі це випромінювання стає суттєвим: піца тут постійно “опромінюється” з усіх боків потоком інфрачервоної радіації з інтенсивністю:

$$I^{wo} = \sigma(T_1^{wo})^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} (603)^4 = 7.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2},$$

тобто, щосекунди кількість енергії величиною близько 0.75 Дж падає на 1 см² піци.⁷

Слід зазначити, що в свою чергу піца також “випромінює потік” з інтенсивністю $I_{\text{піца}} = \sigma(T_{\text{піца}})^4$. Оскільки більшість часу випікання йде на випаровування води, яка міститься в тісті і начинці піци, можемо вважати $T_{\text{піца}} = T_b = 100^\circ\text{C} = 373^\circ\text{F}$, з чого виходить що 15% отриманої енергії піца “повертає” до печі.

У випадку набагато менш нагрітої електричної духовки відповідна кількість енергії, яка падає на 1 см² поверхні піци, більш як удвічі менша, тоді як відбита радіація та ж сама – 1.1 Кват/м²:

⁵ Для тіста, сталі й цегли матеріалом “2” є тісто. Для води матеріалом “1” є сталь.

⁶ Параметри для тіста слід вважати приблизними. Зрозуміло, що точні значення дуже залежать від типу борошна і бродіння/часу підіймання тіста (при останньому процесі тісто насичується газами, які змінюють його густину).

⁷ Тут ми припускаємо, що піца поводить як чорне тіло. У реальності вона трохи відбиває випромінювання, зменшуючи кількість тепла, яке поглинає.

$$I^{\text{so}} = \sigma(T_1^{\text{so}})^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{(503)^4 \text{ W}}{\text{m}^2} = 3.6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2},$$

Тепер час оцінити, яку кількість тепла щосекунди отримує 1 см² нижньої частини піци. За визначенням вона залежить від теплового потоку (3) і щоб отримати його числове значення обчислимо температурний градієнт на поверхні печі таким способом, як вже було зроблено в рівнянні (7):

$$q(t) = \kappa \frac{T_1^{\circ} - T_0}{\sqrt{\pi \chi t}},$$

де T_1° – температура печі. Можна побачити, що в протилежність випромінюванню за законом Стефана–Больцмана, потік тепла, який надходить до піци завдяки теплопровідності, залежить від часу. Відповідно, кількість тепла, яке передається піччю таким способом на 1 см² піци протягом часу τ визначається як

$$Q(\tau) = \int_0^{\tau} q(t) dt = 2\kappa(T_1^{\circ} - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi \chi}}.$$

Отже загальна кількість тепла, яке попадає на 1 см² піци за час τ дорівнює

$$Q_{\text{tot}}(\tau) = \sigma[(T_1^{\circ})^4 - (T_{\text{pizza}})^4] \tau + 2\kappa(T_1^{\circ} - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi \chi}}. \quad (11)$$

Це тепло витрачається на нагрівання 1 см² піци з тіста з температурою $T_2^{\text{d}} = 20^{\circ}\text{C}$ до температури кипіння води $T_b = 100^{\circ}\text{C}$:

$$Q_{\text{heat}} = c^{\text{do}} \rho^{\text{do}} d (T_{\text{pizza}} - T_2^{\text{do}}).$$

Це ще не все. Впродовж процесу випікання досконалої піци ми безсумнівно випаровуємо воду з тіста, томатів, сиру та інших інгредієнтів. Необхідно також врахувати енергію, яка на це витрачається. Якщо припустити, що масова частка води α випаровується з тіста і начинки, отримуємо

$$Q_{\text{boil}} = \alpha L \rho^{\text{water}} d.$$

Тут d товщина піци, яка за нашим припущенням дорівнює $d = 0.5$ см, тоді як $L = 2264.76$ Дж·г⁻¹ – приховане тепло випаровування води.

Об'єднуючи обидва внески в один, можемо записати

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{heat}} + Q_{\text{boil}} = c^{\text{do}} \rho^{\text{do}} d (T_{\text{pizza}} - T_2^{\text{do}}) + \alpha L \rho^{\text{water}} d. \quad (12)$$

Порівнюючи рівняння (11) і (12), знаходимо кінцеве рівняння для визначення “часу випікання” піци:

$$\sigma[(T_1^{\circ})^4 - (T_{\text{pizza}})^4] \tau + 2\kappa(T_1^{\circ} - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi \chi}} = c^{\text{do}} \rho^{\text{do}} d (T_{\text{pizza}} - T_2^{\text{do}}) + \alpha L \rho^{\text{water}} d. \quad (13)$$

Щоб отримати реалістичне значення для часу випікання, важливо знати кількість води, яка випаровується під час випікання. За типовим рецептом для піци «Маргарита» потрібно 240 г тіста і 90 г начинки (яка складається з помідорів і моцарели). Тісто складається приблизно на одну третину з води, а начинка на 80 % (решта – в основному жир з сиру). Разом з втратою ваги в 30 г, води втрачається приблизно 20 %, тобто $\alpha = 0.2$. Враховуючи це і взявши значення питомої теплопровідності і густини для тіста з наведеної таблиці, знаходимо, що $Q_{\text{tot}} = (70+226)$ Дж/см², що дає час випікання в печі на дровах $\tau_{\text{wo}} \approx 125$ с. Для електричної духовки аналогічні розрахунки дають майже на 50% довший час $\tau_{\text{eo}} \approx 170$ с.

Очевидно, нам вдалось підтвердити час, який нам повідомив наш піцайоло: 2 хвилини для випікання в печі на дровах.

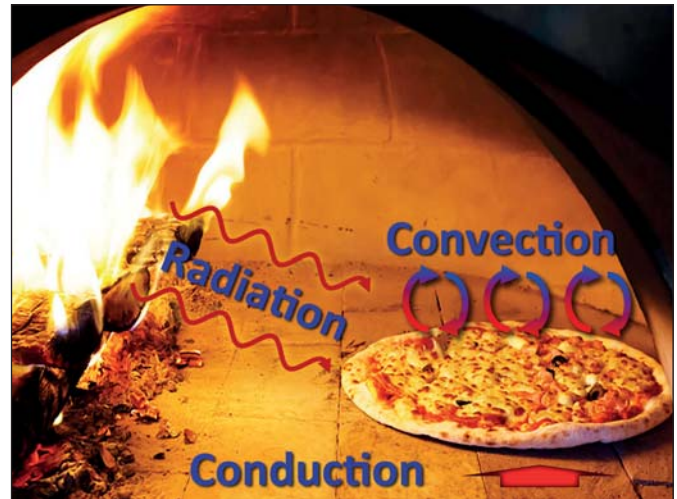


Рис. 10. Механізм теплообміну печі

Результат спроби спекти піцу в електричній духовці – згадуваний раніше незбалансований продукт. Використовуючи рівняння (8), можна легко визначити, що температура в зоні взаємодії між піцою і поверхнею печі досягає 240°C, тоді як температура в цегляній печі на дровах зростає до 390°C (рис. 9). Замінивши T_0 в рівнянні (13), можна визначити, що час випікання за таких екстремальних умов становить приблизно 82 с, таким чином, продуктивність печі зростає майже на 50 %!

Останній “трюк”, виявлений нами, важливий для піц із водянистою начинкою (баклажани, шматочки томатів та інші овочі). У цьому випадку експерт спочатку випікає піцу звичним способом на поверхні печі, але коли низ піци готовий, він підіймає її дерев’яною/алюмінієвою лопатою і тримає над гарячою поверхнею ще півхвилини чи трохи довше для рівномірної тепловіддачі. У такий спосіб вдається уникнути підгоряння тіста і добре пропекти начинку зверху.

Звісно, як це часто буває в фізиці, щоб дістатись до суті явища, ми розглянули найпростішу модель (зокрема, проігнорували третій механізм передачі тепла: конвекцію, яка, на нашу думку, має незначний вплив (рис. 10).

На кінець зазначимо, що досить важко побудувати класичну цегляну піч, а багато клієнтів не бачать різниці між досконалою і пристойною піцою. В цьому полягає причина усіх цих інженерних інновацій: наприклад, керамічне дно зі спеціальної кераміки, яке покликане імітувати дно цегляної печі в сучасних професійних електричних духовках. Щоб пропекти піцу рівномірно, застосовують обертання гарячої поверхні – конвекційні печі імітують потік газу в дров’яних печах, та багато інших речей. Але сухе тепло і запах дров у традиційних цегляних печах залишаються ідеальним способом приготувати найсмачнішу піцу.

Подяки. Ми б хотіли висловити подяку римським піцайоло **Антоніо** і **Вінченсо** за розкриття деяких секретів мистецтва приготування піци. Особлива подяка містеру **Женг Жу**, студенту Шанхайського університету, який відвідував лекції одного із авторів і який зробив декілька суттєвих зауважень, які допомогли нам остаточно виправити текст статті. ■

Ця стаття є другою з циклу науково-популярних статей **Андрія Варламова** з фізики харчових технологій (див. статтю “Варити, парити чи полоскати?” в № 1 “Світогляду”, 2018)