



Андрій Варламов

# Фізика приготування смачної піци



Андреас Глатц



Серджіо Грассо

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

Італійське слово «піца» вперше зустрічається в латинському пергаментному рукописі (Codex Diplomaticus Cajtanus), в якому наводиться список пожертв єпископу Гети (Неаполь). У документі, який датується 997 роком н.е., зазначена поставка *duodecim pizze* («дванадцяти піц») 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 *πικτή* = затверділий; чи від латинського *picta*=розмальований, прикрашений, чи від *pinsere* = розкатаний, розтягнутий.

Починаючи з 8-го сторіччя 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 з зернового тіста на основі опари, покритий сумішшю олії, часнику, цибулі, трав, інколи додавалося подрібнене м'ясо або маленька рибка, який був майже таким як сучасна турецька піде. 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, і 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 латиську «плаценту» (*Placenta*) =плоский хліб.

Римський поет **Вергілій** 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."**



Рис.1 Бюст Вергілія з надгробку в Неаполі, Італія

Безперечно, що більш як двадцять сторіччя тому греки і римляни створили прототипи піци, але саме неаполітанці були тими «винахідниками» цієї недорогої страви швидкого приготування, які відповідальні за додавання інгредієнтів, які загальновиізано асоціюються з піцою в наш час – томатів і сиру моцарела (рис.2). Неаполітанці познайомились з екзотичною рослиною помідор завдяки Колумбу, але фрукт вважався отруйним. Томати, які ризикували їсти в основному селяни, вперше появились у книзі рецептів "*Il Cuoco Galante*" (Приготування вишуканих страв), написаній шеф-кухарем Вінченцо Коррадо у 1819 р. Про «моцарелу» вперше згадується у книзі рецептів "Opera" авторства



Рис. 2 Моцарела ді Буфала і помідори чері

Бартоломео Скаппі (1570). Аж до сьогодні, справжня моцарела все ще виготовляється з жирного молока буйволів поблизу Неаполя (рис.3). Це дуже делікатний продукт, не тільки з огляду на його смак, але й завдяки з проблемою його зберігання – моцарела не виносить низькі температури – якщо її зберігати в холодильнику вона стає «резиноподібною». Її слід зберігати тільки у власній сироватці при кімнатній температурі впродовж декількох днів.

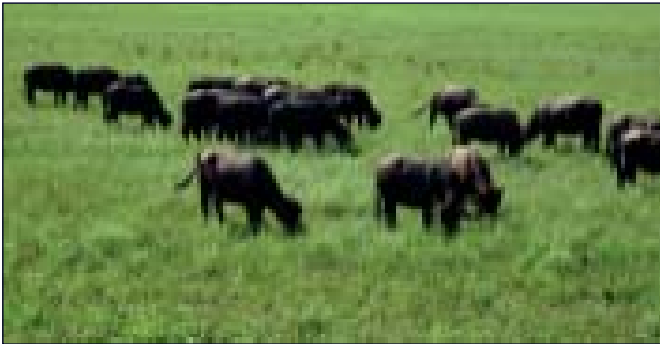


Рис. 3 Ферма для буйволів поблизу Капачо, Італія

З документів випливає, що до 18-го сторіччя неаполітанська піца була простою стравою із запеченої чи підсмаженої локшини приправленої салом, бринзою, оливками, сіллю або маленькою рибкою *cecinielli*. Упродовж 19-20 сторіччя виробники піци ("pizzaioli" - піцайолі) заповнили вулиці Неаполя, продаючи за копійки випечені чи підсмажені піци, политі томатним соком і приправлені листям базилику. 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 базиликом. Комбінація з червоного, білого і зеленого символізувала кольори італійського прапора і 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.

У сучасній Італії існують різноманітні регіональні способи виготовлення піци. Неаполітанці знамениті своїми круглими піцями з високим хрустким обідком – *cornicione*. Окрім згадуваної Маргарити стандартною є піца *Наполетана* – *Pizza Napoletana* (визнана в ЄС як *Guaranteed Traditional Speciality*), приправлена помідорами, моцарелою та анчоусами. Найпростіша версія піци називається *Маринара* (*Marinara*), яка просто притрушена помідорами, часником, майораном й присмачена олією. Вишуканою і багатого є піца *Кальцоне* (*Calzone*) – круг з тіста складений навпіл заповнюється рикотою, моцарелою, саямі або прошуто.



Рис.4 Піца марінара

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 *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. Сарданейра (*Sardenaira*) – корж з 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 *Abruzzi* 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 *Apulia* улюбленою є *Pizza Pugliese*, тонка вкрита томатним соусом і великою кількістю тушкованої цибулі (анчоуси і оливки не обов'язкові). Іншою цікавинкою в *Apulia* є панзерото *Panzerotto* – маленька піца-кишенька, 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 саямі (*soppressata*) або *'nduja*, пастоподібну пекучу суміш смальцю і перцю чілі, ймовірно завезену до Калабрії іспанцями.

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

Панада *panada* з Сардинії – поживна піца наповнена баклажанами, бараниною і помідорами чи в версії з морепродуктами – рибою або жирним місцевим вугром. Будучи по суті «відкритим сендвічем», неаполітанська піца появилася в США наприкінці 19-го на початку 20-го сторіччя, коли італійські емігранти, як і мільйони інших європейців, почали переїжджати до Нью-Йорка, Трентона, Нью-Хейвена, Бостона, Чикаго і Сент-Луїса. Аромати й запахи нехитромудрих піц, які продавалися на вулицях неаполітанськими піцайолі, 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, власник Ломбарді, отримав ліцензію на відкриття першої піцерії на Спрінг Стріт, Манхетен.

Завдяки великому пливу італійських іммігрантів на американську культуру, в США виникли свої регіональні типи піц, деякі з яких тільки віддалено схожі на італійський оригінал. Чикаго має свій власний стиль приготування піци в глибокій формі. Детройт також має свій унікальний спосіб повторного випікання, з сиром який цілком покриває скоринку піци. 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 Два сучасних римських піцайоло на фоні цегляної печі і піца Маргарити

Завдяки своїй допитливості автори почали вивчати секрети приготування піци. Правило номер один, як нам сказали італійці, необхідно завжди шукати піцерію з піччю на дровах (а не електричною). Гарні піцерії пишуться своїми "forno" ("піч" італійською), у якій ви власними очима можете спостерігати весь процес випікання. Піцайоло формує диск з 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 вами, вкрита апетитними бульбашками сиру, заохочуючи вас її з'їсти і запити її дзбаном хорошого пива.

Автори отримали корисну пораду від друга піцайоло з римської піцерії, яку вони 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<sup>1</sup> є оптимальною температурою 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

<sup>1</sup>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 180-250г, 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

до 390°C і піци «вилітають» з печі кожні 50 с (отже, «час випікання» кожної з них дорівнює приблизно півтори хвилини). Проте, їхня якість не така: 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 і немає термометра під рукою. Ваша мама поклала б руку на ваше чоло і відразу ж сказала б: «у тебе висока температура, завтра до школи не підеш». 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 маминого 36°C, ясно з симетричності задачі, що температура в області контакту (T<sub>0</sub>) 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).

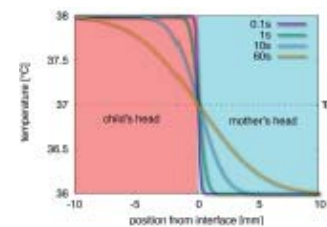


Рис.6 Температурний профіль між головами матері і дитини - 0.1с, 1с, 10 с і 60 с після їхнього контакту

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)

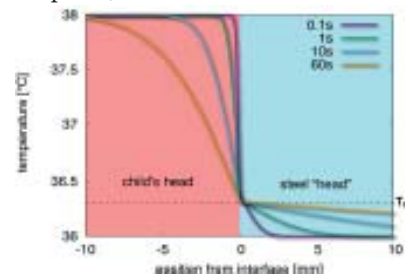


Рис.7 Те ж, що й на рис.6 тільки з холоднішою сталеву «головою»

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 енергію системи (такої як голо-

ва 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. Як і робота, тепло не тип енергії, а скоріше є величиною зручною для описання переносу енергії. Кількість тепла, необхідна для збільшення температури одиниці маси матеріалу на один градус, називається питомою теплоємністю матеріалу:

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

де  $M$  – маса системи, а  $\Delta Q$  – кількість тепла, необхідна для нагрівання системи на температуру  $\Delta T$ . З цього виразу зрозуміло, що теплоємність вимірюється як  $\text{Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{К}^{-1}$  в одиницях СІ.

У випадку теплового контакту між двома системами з різною температурою тепло переходить від теплішої системи до холоднішої. Густина теплового потоку  $q$  є кількістю тепла  $\Delta Q$ , 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  $\rho$  – густина маси<sup>2</sup>. Припустивши, що  $\Delta x$  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  $\Delta T$ , який описує показник зміни температури у просторі. Коефіцієнт  $\kappa$  в рівнянні (3) є теплопровідністю й описує здатність матеріалу передавати тепло, якщо до нього прикладений тепловий градієнт<sup>3</sup>. 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 підведений тепловий потік (рис.8). Припустимо, що впродовж часу  $t$  температура в невеликому циліндрі з висотою  $L(t)$  і поперечним перерізом  $S$  змінилася

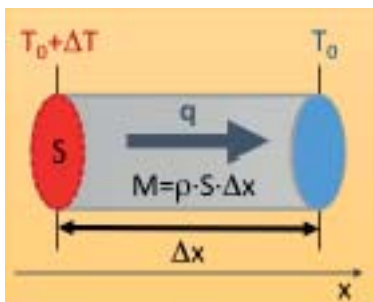


Рис.8 Тепловий потік в малому циліндрі від гарячого ( $T_0 + \Delta T$ ) до холодного ( $T_0$ ). Зазначимо, що температура зменшується зліва направо

ся на величину  $\Delta T$ .<sup>4</sup> Перепишемо рівняння (3), замінивши  $\Delta x$  на  $L(t)$ :

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

Розв'язавши рівняння (4) отримаємо 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  $\kappa$ ,  $c$  і  $\rho$ . Параметр  $\chi = \kappa / c\rho$  називають коефіцієнтом теплової дифузії або коефіцієнтом теплопровідності, 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  $\kappa_1$ ,  $c_1$ ,  $\rho_1$  і температурою  $T_1$  на  $-\infty$ , і справа з параметрами  $\kappa_2$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$  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:

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

Потрібно зазначити, що час не входить до рівняння (8) (тобто температура в зоні взаємодії залишається постійною в процесі теплообміну, див. рис. 6,7 і 9). Для однакових матеріалів з 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  $37^\circ\text{C}$  при взаємодії руки матері і чола дитини. Якби рука матері була зроблена зі сталі,  $\nu_{21} \geq 1$  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.

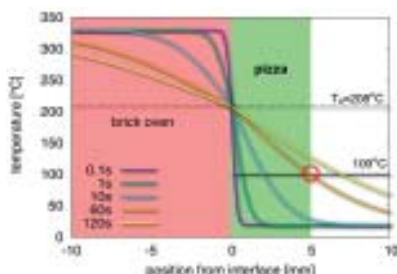
Нарешті ми готові обговорити переваги цегляної печі. Почнемо з обчислення температури в зоні взаємодії між піцою, яка посаджена в цегляну піч, і розігрітою робочою поверхнею останньої. Усі необхідні параметри представлені в таблиці:

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> Цей 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 $\kappa$ [Вт/(м×К)]	Масова густина $\rho$ [кг×м <sup>3</sup> ]	Temperature conductivity $\chi$ [м <sup>2</sup> /с]	$\nu_{21}^5$
Матеріал					
тісто <sup>6</sup>	2-2.5×10 <sup>3</sup>	0.5	0.6-0.8×10 <sup>3</sup>	2.5-4.2×10 <sup>-7</sup>	1
харчова сталь	4.96×10 <sup>2</sup>	18	7.9×10 <sup>3</sup>	4.5×10 <sup>-6</sup>	0.1
вогнетривка цегла	8.8×10 <sup>2</sup>	0.86	2.5×10 <sup>3</sup>	4.0×10 <sup>-7</sup>	0.65
Вода (@25°C)	4.2×10 <sup>3</sup>	0.58	1.0×10 <sup>3</sup>	1.4×10 <sup>-7</sup>	0.2



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

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, при таких умовах 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 неаполітанських піцеріях, де звичною є температура печі між 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 знизу (римської) піци має бути 210°C. Яка тоді необхідна температура в електричній духовці зі сталеву поверхнею для випікання?

Відповідь отримаємо розв'язавши відносно  $T_{eo}$  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 холодніша ніж цегляна:  $T_1^{eo} \approx 230^\circ\text{C}$

Здається, якщо ти в змозі забути пахощі палаючих дров, потрискання 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?

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

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

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

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 см<sup>2</sup> поверхні печі, визначається законом Стефана-Больцмана:

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

де  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) 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  $T_1^{wo} = 330^\circ\text{C} = 603\text{K}$ , 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 см<sup>2</sup> піци.<sup>7</sup>

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 см<sup>2</sup> поверхні піци, більш як удвічі менша:

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

Тоді як відбита радіація таж сама: 1.1 кват/м<sup>2</sup>.

Тепер час оцінити, яку кількість тепла щосекунди отримує 1 см<sup>2</sup> 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):

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

де  $T_1^o$  – температура печі. Можна побачити, що в протилежність випромінюванню за законом Стефана-Больцмана, потік тепла, яке надходить до піци завдяки теплопровідності, залежить від часу. Відповідно, кількість тепла, яке передається піччю таким способом 1 см<sup>2</sup> піци протягом часу  $\tau$  визначається як

$$Q(\tau) = \int_0^\tau q(t)dt = 2\kappa(T_1^0 - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi\chi}}$$

Отже загальна кількість тепла, яке попадає на 1 см<sup>2</sup> піци за час  $\tau$  є

$$Q_{\text{tot}}(\tau) = \sigma[(T_1^0)^4 - (T_{\text{pizza}})^4]\tau + 2\kappa(T_1^0 - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi\chi}} \quad (11)$$

Це тепло витрачається на нагрівання 1 см<sup>2</sup> піци з тіста з температурою  $T_2^d = 20^\circ\text{C}$  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, помідорів, сиру та інших інгредієнтів. Необхідно також врахувати енергію, яка на це витрачається. Якщо припустити, що масова частка води  $\alpha$  випаровується з тіста і начинк, 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  $L = 2264.76 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  – 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:

$$\sigma [(T_1^0)^4 - (T_{\text{pizza}})^4] \tau + 2\kappa (T_1^0 - T_0) \sqrt{\frac{\tau}{\pi\chi}} = c^{\text{do}} \rho^{\text{do}} d (T_{\text{pizza}} - T_2^{\text{do}}) + \alpha L \rho^{\text{water}} d \quad (13)$$

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 вище таблиці знаходимо, що  $Q_{\text{tot}} = (70 + 226) \text{ Дж} / \text{см}^2$ , що дає час випікання в печі на дровах  $\tau_{\text{wo}} \approx 125 \text{ s}$ . Для електричної духовки аналогічні розрахунки дають майже на 50% довший час  $\tau_{\text{eo}} \approx 170 \text{ s}$ . Очевидно, нам вдалося

підтвердити час, який нам повідомив наш піцайоло: 2 хвилини для випікання в печі на дровах. 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  $240^\circ\text{C}$ , тоді як температура в цегляній печі на дровах зростає до  $390^\circ\text{C}$ . Замінивши  $T_0$  в рівнянні (13) можна визначити, що час випікання при таких екстремальних умовах становить приблизно 82 секунди, таким чином продуктивність печі зростає майже на 50%!

Останній “трюк” виявлений нами важливий для піц з водянистою начинкою (баклажани, шматочки помідор, 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. Див. 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 **Атоніо** і **Вінченсо** за розкриття деяких секретів мистецтва приготування піци. Особлива подяка містеру **Ченгу Дзоу**, студенту Шанхайського університету, який відвідував лекції авторів і який зробив декілька суттєвих зауважень, які допомогли нам виправити остаточний текст статті. ■

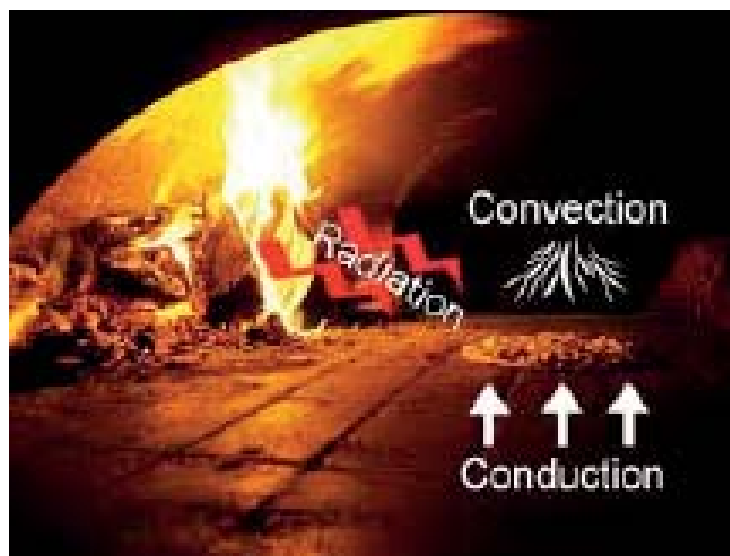


Рис. 10. Механізм теплообміну печі