

**Waldemar NAWROCKI, Michał MACIEJEWSKI**  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI  
60-965 Poznań, ul. Polanka 3

## Badania termodynamiczne filiżanki gorącej herbaty

Prof. dr hab. inż. Waldemar NAWROCKI

Jest absolwentem Politechniki Poznańskiej. Pracuje na Politechnice Poznańskiej od 40 lat, obecnie na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji na stanowisku profesora zwyczajnego. Prowadzi wykłady z Elektroniki, Komputerowych systemów pomiarowych, Rozproszonych systemów pomiarowych i Metrologii kwantowej. Do prowadzonych wykładów napisał 16 książek i skryptów jako autor lub współautor. Był organizatorem czterech konferencji międzynarodowych Quantum Metrology (2006 – 2013).

e-mail: nawrocki@et.put.poznan.pl



Inż. Michał MACIEJEWSKI

Jest absolwentem studiów inżynierskich na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej w 2013 r. W ramach pracy dyplomowej inżynierskiej przeprowadził część badań i pomiarów prezentowanych w artykule. Obecnie jest studentem ostatniego semestru studiów magisterskich na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji PP.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy i pomiarów wymiany ciepła między filiżanką z gorącym napojem a otoczeniem. W szczególności badano, po jakim czasie temperatura napoju w filiżance zalanej wrzątkiem spadnie do poziomu umożliwiającego wypicie napoju bez oparzenia. Na grupie 24 badanych osób określono najwyższą akceptowaną temperaturę  $T_{acp}$  spożywanego napoju. Średnia wartość temperatury  $T_{acp}$  wynosi 63 °C. Na podstawie pomiarów określono czas stygnięcia kubka z herbatą od chwili zalania wrzątkiem do chwili osiągnięcia temperatury 63 °C. Wynosił on około 12 minut dla temperatury otoczenia 21 °C.

**Słowa kluczowe:** temperatura napoju, stygnięcie napojów, parowanie.

### Thermodynamic studies of a cup of hot tea

#### Abstract

In this paper results of measurements of self-cooling process of hot beverages served in open cup are presented. With a group of 24 persons the maximal acceptable temperature  $T_{acp}$  of liquids was estimated. The average value of the  $T_{acp}$  temperature is 63 °C (Fig. 2). On the basis of experiments the self-cooling time of beverage in a cup from 100 °C to 63 °C was measured (Fig. 3). Self-cooling of the hot beverage in an open cup takes place as a result of heat exchange between the cup and the ambient air by radiation and free convection. On the basis of the measurements was determined the self-cooling time for a cup of tea since filling the cup with the boiling water. The self-cooling time from the temperature of 100 °C to 63 °C is in the range from 9 to 13 minutes (for cups of different weights and capacities), the ambient temperature was 21 °C. The experiments contain also measurements of a mass loss by evaporation in the beverage over time. For example, after 30 minutes cooling the loss of mass was of 4% (Fig. 5). Serving of hot beverages at the right temperature is important for hospitals and school canteens and other catering establishments. Understanding the research results of the problem may also help in the planning of activities with significant time constraints, such as planning breaks or interruptions in schools, intended also to drink a warm beverage.

**Keywords:** temperature of a beverage, self-cooling of beverages, evaporation.

## 1. Wstęp

W artykule przedstawiono problem stygnięcia napojów, serwowanych w stanie gorącym w otwartych naczyniach, do temperatury umożliwiającej wypicie napoju bez narażenia się na oparzenie. Stygnięcie gorącego napoju w otwartym naczyniu odbywa się wskutek wymiany ciepła między naczyniem a otoczeniem.

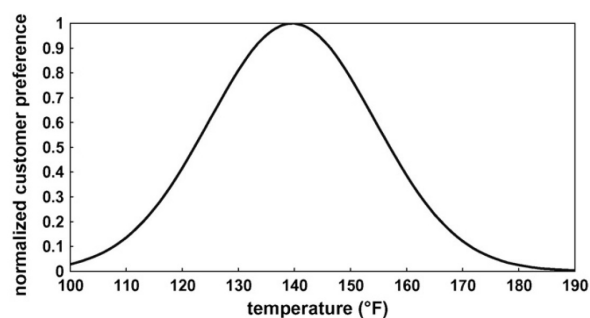
Zmierzone proces stygnięcia napojów i wyznaczono czas, po którym gorący napój (wrzątek) ostygnie i może być serwowany konsumentom. Badania podzielono na dwa zadania:

- wyznaczanie najwyższej temperatury napojów  $T_{acp}$  akceptowanej przez konsumentów,
- pomiary temperatury stygnącego napoju w funkcji czasu w celu wyznaczenia czasu stygnięcia  $t_{st}$  od chwili zalania naczynia (kubka) wrzątkiem do momentu ostygnięcia napoju do akceptowalnej temperatury  $T_{acp}$ . Te badania przeprowadzono dla

kilku różnych napojów oraz naczyń o różnej masie i kształcie. W każdym przypadku wyznaczono wzór matematyczny opisujący proces stygnięcia napoju. Zmierzono także ubytek masy gorącego napoju (wskutek parowania) w funkcji czasu.

## 2. Wyznaczanie najwyższej akceptowanej temperatury napoju

Najwyższa temperatura  $T_{acp}$  napoju akceptowana przez konsumenta jest miarą subiektywną. Należy wspomnieć, że w literaturze nie znaleziono opisu lub wyników takich badań. Badania na podobny temat przedstawiono w czasopiśmie medycznym Burns [1], lecz opisano tam badania temperatury napoju  $T_{opt}$  najbardziej odpowiadającej konsumentowi, co jest także miarą subiektywną. Badania optymalnej temperatury  $T_{opt}$  napoju (była to kawa bez dodatków) przeprowadzono przy współudziale 300 testowanych osób. Ustalono średnią wartość optymalnej temperatury  $T_{opt}$ , która jest równa 60 °C (w pracy [1] podaną ją w stopniach Fahrenheita: 140 °F) z odchyleniem standardowym 8,2 °C (14,8 °F) - rys. 1. W pracy [1] podano także, że ryzyko poparzenia gorącym napojem wzrasta wykładniczo powyżej progu temperatury 80 °C (175 °F).

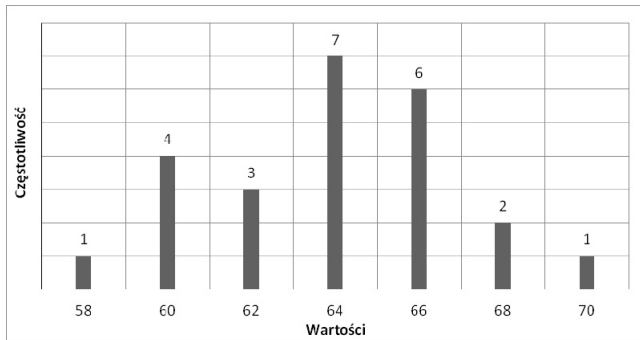


Rys. 1. Histogram optymalnej temperatury  $T_{opt}$  gorącego napoju (najodpowiedniejszej dla konsumenta) znormalizowany dla liczby konsumentów [1]

Fig. 1. The histogram of the optimal temperature  $T_{opt}$  of a hot beverage (most satisfied for a consumer)

W wyniku naszych badań najwyższą akceptowalną temperaturę  $T_{acp}$  wyznaczono za pomocą testu, w którym brały udział 24 osoby. Test polegał na próbowaniu napoju, herbaty bez dodatków, serwowanej w zróżnicowanej temperaturze a następnie na wyborze napoju o najwyższej temperaturze akceptowanej przez konsumenta-testera. Zarejestrowane wartości najwyższej temperatury  $T_{acp}$  napoju, akceptowanej przez konsumentów, zawierają się w przedziale od 56,2 °C do 69,6 °C. Wartość średnia najwyższej akceptowanej temperatury  $T_{acp}$  napoju wynosi 63 °C a odchylenie standardowe od tej średniej to 3,2 °C [2]. Pomiary temperatury przeprowadzono termometrem własnej konstrukcji o niepewności pomiaru 0,5 °C i rozdzielczości 0,1 °C, wyposażonym w czujnik

rezystancyjny KTY10 o stałej czasowej  $\tau_{cz} = 5$  s (dla wymuszenia powietrze – woda). Na rysunku 2 pokazano histogram wartości temperatury  $T_{acp}$  wskazanej przez podaną liczbę konsumentów.



Rys. 2. Histogram najwyższej akceptowanej temperatury  $T_{acp}$  gorącego napoju wskazanej przez liczbę konsumentów

Fig. 2. The histogram of the maxima acceptable temperature  $T_{acp}$  of a hot beverage

### 3. Pomiary procesu stygnięcia gorącego napoju

Pomiędzy obiektami o różnej temperaturze zachodzi przepływ ciepła od obiektu cieplejszego do zimniejszego. W badaniach procesu stygnięcia gorących napojów, w temperaturze otoczenia, przedstawianych w tym artykule, wykorzystano 4 naczynia o parametrach pokazanych w tabeli 1. Z punktu widzenia dynamiki – stygnięcie napoju w naczyniu jest procesem inercyjnym ze stałą czasową  $\tau$ .

Tab. 1. Parametry naczyń wykorzystanych w badaniach czasu stygnięcia gorącego napoju

Naczynie	Masa, g	Średnica, mm	Wysokość, mm	Masa kubka i napoju, g	Stała $\tau$ kubka z napojem, min
Kubek_1	363	80	94	363 + 287	29
Kubek_2	240	78	85	240 + 232	26
Kubek_3	165	77	68	165 + ki168	22,5
Kubek_4	3	68	87	3 + 183	26

Pomiary charakterystyki stygnięcia napoju, czyli temperatury płynu w funkcji czasu, przeprowadzono w 10 seriach dla każdego naczynia. Wyniki tych pomiarów zestawiono na rysunku 2.

Szybkość stygnięcia zależy od pojemności cieplnej, zarówno naczynia jak i nalanej cieczy, a także od różnicy między temperaturą początkową  $T_p$  (około 98°C) cieczy a temperaturą otoczenia  $T_{ot}$ , którą zwykle ma naczynie przed zalaniem wrzątkiem,  $\Delta T = T_p - T_{ot}$ . Czas stygnięcia napoju  $t_{st}$  od temperatury początkowej  $T_p$  do  $T_{acp}$  wynosi od 9 do 13 min dla różnych kubków (dla temperatury otoczenia 21 °C) – rys.3. Przykładowo, dla kubka 2 o masie 240 g zalanego wrzątkiem wody o masie 232 g i stałej czasowej  $\tau = 26$  min (stała  $\tau$  opisuje obiekt: kubek z napojem) czas stygnięcia  $t_{st} = 12$  min. Proces stygnięcia cieczy w naczyniu w funkcji czasu przebiega według wzoru:

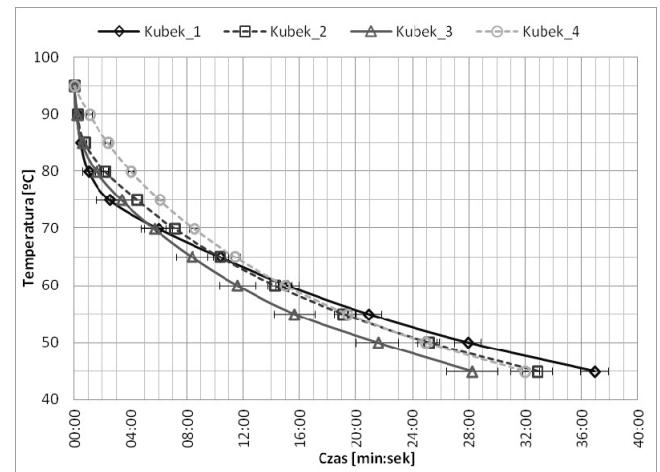
$$T(t) = (T_p - T_{ot}) \exp(-t/\tau) + T_{ot}, \quad (1)$$

gdzie:  $t$  – czas stygnięcia [min],  $T_p$  – temperatura początkowa,  $T_p = 98$  °C,  $T_{ot}$  – temperatura otoczenia,  $T_p = 21$  °C,  $\tau$  – stała czasowa napełnionego kubka [min].

Przykładowo, dla kubka 2 napełnionego gorącym napojem (herbatą):

$$T(t) = 77 \times \exp(-t/26) + 21 \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (2)$$

Badano stygnięcie różnych gorących napojów: wody, herbaty, kawy, mleka, zupy instant (barszczu). Nie stwierdzono wpływu rodzaju napoju na przebieg procesu stygnięcia [2]. Tłumaczy się to zbliżoną strukturą zawartości tych napojów. Wszystkie one zapierają ponad 95% wody.



Rys. 3. Proces stygnięcia napoju - temperatura gorącego napoju w kubku w funkcji czasu dla temperatury otoczenia 21 °C

Fig. 3. Temperature of a hot beverage vs time at the ambient temperature of 21 °C

### 4. Wymiana ciepła i parowanie cieczy

Stygnięcie napoju w naczyniu odbywa się wskutek wymiany ciepła z otoczeniem. Wymiana ciepła jest możliwa wyłącznie wtedy, kiedy istnieje różnica temperatury między rozważanymi obiektami. Wyróżnia się trzy rodzaje wymiany ciepła: przewodnictwo, konwekcja (unoszenie) i promieniowanie. Przewodnictwo ma decydujące znaczenie przy transporcie ciepła w ciałach stałych i cieczach lub na styku ciała stałego z cieczą. Konwekcja dotyczy przepływu ciepła między ośrodkami o różnej gęstości masy, np. z ciała stałego lub cieczy do gazu. Wymiana przez konwekcję może zostać zintensyfikowana przez wymuszenie przepływu ciepła, np. przez wiatr lub sztuczny nawiew. Konwekcja ma najczęściej postać swobodną, niewymuszoną. Promieniowanie odbywa się przez emisję fal elektro-magnetycznych o długości  $\lambda$  w zakresie od 0,5  $\mu\text{m}$  do około 5  $\mu\text{m}$ . Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann natężenie promieniowania cieplnego  $M$  obiektu jest bardzo silnie zależne od jego temperatury [3]:

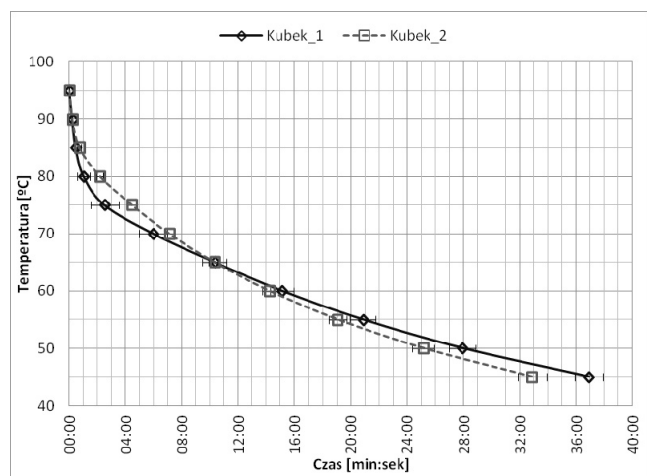
$$M = C_o \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – temperatura w skali bezwzględnej,  $\varepsilon$  – emisyjność całkowita,  $C_o$  – techniczna stała promieniowania ciała czarnego,  $C_o = 5,67 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

W procesie stygnięcia gorących napojów duże znaczenie ma wymiana ciepła przez unoszenie swobodne oraz promieniowanie. W wymianie ciepła między kubkiem a powietrzem przewodnictwo ciepła ma mniejsze znaczenie, chociaż również występuje.

Proces stygnięcia gorącego napoju przebiega w dwóch fazach. Po nalaniu wrzątku wody do naczynia początkowa temperatura napoju (lub samej wody) wynosi 96-98 °C a temperatura naczynia (kubka lub filiżanki) jest równa temperaturze otoczenia. W pierwszej fazie następuje przewodzenie ciepła od cieczy do ścianek naczynia a na końcu tej fazy temperatura naczynia zrównuje się z temperaturą cieczy. Przy ustalonej masie cieczy szybkość tego procesu zależy od pojemności cieplnej naczynia a ta z kolei od masy i wartości ciepła właściwego materiału naczynia. Dla badanych naczyń (tabela 1) czas trwania pierwszej fazy stygnięcia wynosi około 1 minuty. Należy wspomnieć o tym, że ciepło właściwe wody ( $c_w = 4,19 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ ) jest znacznie większe od ciepła

właściwego materiału kubka, np. szkła ( $c_{sz} = 0,75 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ ) lub srebra ( $c_{Au} = 0,24 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ ). Zatem zalanie wrzątkiem ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) o masie np. 200 g kubka szklanego o tej samej masie 200 g i temperaturze początkowej  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  powoduje wyrównanie temperatury kubka i cieczy na poziomie  $86 \text{ }^\circ\text{C}$ . W przypadku użycie kubka ze srebra temperatura wyrównania byłaby jeszcze wyższa i wyniosła  $94 \text{ }^\circ\text{C}$ . Przy tym oszacowaniu hipotetycznej temperatury wyrównania pominięto dynamiczny efekt stygnięcia kubka z wodą w procesie wyrównywania, który oczywiście występuje.



Rys. 4. Proces stygnięcia napoju - temperatura gorącego napoju w kubku w funkcji czasu dla temperatury otoczenia  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

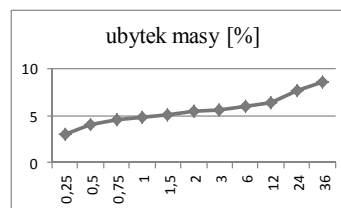
Fig. 4. Temperature of a hot beverage vs time at the ambient temperature of  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

Wartości stałej czasowej kubka z napojem podanej w tabeli 1 dotyczą stałej uśrednionej za okres stygnięcia, bez uwzględnienia dwóch faz stygnięcia. Dwie fazy stygnięcia napoju w kubku są wyraźnie widoczne na rys. 4 pokazującego proces stygnięcia napoju w kubku 1 o dużej masie i kubka 4 o bardzo małej masie. Na podstawie pomiarów można stwierdzić, że chociaż średnia wartość stałej czasowej napoju z kubkiem 1 (masa kubka z napojem  $m = 363 + 277 = 650 \text{ g}$ ) wynosi 29 min, to w drugiej fazie stygnięcia wynosi  $\tau = 39 \text{ min}$ . Druga faza stygnięcia to oddawanie ciepła od kubka do atmosfery.

Dla rozważanego zakresu temperatury (od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) przepływ ciepła wskutek konwekcji swobodnej i wskutek promieniowania mają wartości tego samego rzędu wielkości. Można zgrubnie obliczyć ubytek ciepła z napojem w wyniku ochłodzenia się od  $98 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $63 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na przykład dla kubka 2 ubytek ciepła wynosi  $26 \text{ kJ}$ , z czego na wymianę ciepła przez promieniowanie przypada  $8 \text{ kJ}$  (według obliczeń za pomocą wzoru (3)), a przez konwekcję –  $18 \text{ kJ}$ . Z podanych liczb wynika, że istotne przyspieszenie procesu stygnięcia można osiągnąć zwiększając konwekcyjną wymianę ciepła przez zastosowanie np. nawiewu powodującego konwekcję wymuszoną. W obliczeniach przyjęto średnią temperaturę promieniowania  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  i emisyjność szkła  $\varepsilon = 0,9$ .

Rejestrowano także ubytek masy cieczy w czasie stygnięcia wskutek parowania. Po zalaniu szklanki wrzątkiem wody o masie  $220 \text{ g}$  stwierdzono ubytek masy wody: po 15 min – 3%, po 1 godzinie – 4,8% a po 24 h – 5,5%, przy temperaturze otoczenia  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wykres procentowego ubytku masy wody w funkcji czasu (podanego w godzinach) pokazano na rysunku 5.

Intensywność parowania jest funkcją temperatury. Malejąca szybkość ubytku masy cieczy z upływem czasu wynika przede wszystkim z obniżania się temperatury cieczy. Pomiar masy z rozdzielczością  $1 \text{ g}$  wykonano za pomocą cyfrowej wagi kuchennej typu Fiesta firmy Soehnle.



Rys. 5. Ubytek masy napoju w funkcji czasu [h] wskutek parowania w czasie 36 h od chwili napełnienia kubka wrzątkiem wody, przy temperaturze otoczenia  $19 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 5. The mass loss of beverage due to evaporation for 36 hours since the time of filling a cup by boiling water, at the ambient temperature of  $19 \text{ }^\circ\text{C}$

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono badania najwyższej temperatury gorącego napoju akceptowanej przez konsumenta oraz pomiary stygnięcia gorących napojów serwowanych w odkrytym kubku lub filiżance. Dla grupy 24 badanych osób określono najwyższą akceptowaną temperaturę  $T_{acp}$  spożywanego napoju. Średnia wartość temperatury  $T_{acp} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$  z odchyleniem standardowym  $3,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Warto zauważyć, że najwyższa akceptowana temperatura jest zaledwie o  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  wyższa od optymalnej temperatury napojów. Zatem lubimy gorące napoje.

Stygnięcie gorącego napoju w otwartym naczyniu odbywa się wskutek wymiany ciepła między naczyniem a powietrzem przez konwekcję swobodną i promieniowanie. Na podstawie pomiarów określono czas stygnięcia kubka z herbatą od chwili zalania wrzątkiem do osiągnięcia temperatury  $T_{acp}$ . Czas stygnięcia napoju do temperatury  $63 \text{ }^\circ\text{C}$  zawiera się w przedziale od 9 do 13 minut (dla kubków o różnej masie i pojemności), dla temperatury otoczenia  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . W badaniach mierzono także ubytek masy napoju wskutek parowania w funkcji czasu. Przykładowo, po 15 minutach stygnięcia stwierdzono ubytek 3% masy napoju. Rodzaj gorącego napoju (herbata, kawa, mleko) nie miał widocznego wpływu na czas jego stygnięcia.

Podawanie gorącego napoju w odpowiedniej temperaturze ma znaczenie dla stołówek szpitalnych i szkolnych oraz dla innych placówek zbiorowego żywienia. Poznanie wyników badań tego problemu może także być pomocne setkom milionów ludzi w planowaniu czynności przy znacznych ograniczeniach czasowych, np. w planowaniu przerw w pracy lub przerw w szkołach, przeznaczonych także na wypicie ciepłego napoju.

*Badania były finansowane z projektu Politechniki Poznańskiej nr 08/83/DSPB/4709.*

## 6. Literatura

- [1] Brown F. and Diller K.R.: Calculating the Optimum Temperature for Serving Hot Beverages, Burns - Journal of the International Society for Burn Injuries, vol. 34 (2008), s. 648-654.
- [2] Maciejewski M.: Kawa czy herbata? Parametry cieplne naczyń z płynami spożywczymi. Praca inżynierska, Politechnika Poznańska - Wydział Elektroniki i Telekomunikacji, 2013.
- [3] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria. Przyrządy i metody, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1998.

*otrzymano / received: 15.07.2014*

*przyjęto do druku / accepted: 01.10.2014*

*artykuł recenzowany / revised paper*