

SCHLIEREN EFEKT

Fizika

Raziskovalna naloga

Gabrijel Pflaum, 4. letnik,

Jan Dolinšek, 4. letnik,

mentor: prof. Peter Gabrovec

2021

Gimnazija Bežigrad

POVZETEK

V raziskovalni nalogi sva postavila sistem Schlieren za opazovanje zračnih tokov in temperaturnih razlik. Opazovala sva mejno plast pri naravni konvekciji ob segreti navpični steni. Izmerila sva hitrost zračnega toka in debelino temperaturne mejne plasti. Pri merjenju sva uporabila digitalno kamero, postavitev Schlieren, tri termometre in programsko opremo. Za vročo steno sva uporabila stekleno čašo s segreto vodo. Izmerjene podatke sva primerjala s teoretičnim modelom Simona Ostracha. Debelino plasti in hitrost sva merila pri štirih različnih temperaturah stene in pri vsaki temperaturi na dveh različnih višinah. Pri hitrosti sva primerjala izmerjeno hitrost s povprečno hitrostjo teoretičnega zračnega toka na določenem območju, pri temperaturi pa debelino mejne plasti in obliko svetlostne krivulje s teoretično temperaturno krivuljo. Ugotavljala sva natančnost meritev s to metodo in možne vzroke za odstopanja.

Ključne besede: Schlieren, naravna konvekcija, mejna plast pri konvekciji, zračni tok, temperaturni gradient

For our research paper, we set up a Schlieren imaging system for observing air currents and temperature gradients. We observed the boundary layer of natural convection on a heated vertical plane. We measured the velocity of the air current and the thickness of the boundary layer. For the measurements, we used a digital camera, a Schlieren system, three thermometers and software for analysing data. For the heated vertical plane, we used a beaker filled with hot water. We compared our measured data with the theoretical model of Simon Ostrach. The thickness of the boundary layer and the velocity of the current were measured at four different temperatures and at two different heights. We compared our measured velocity with the average velocity of the theoretical air current on a determined height. The measured thickness of the boundary layer was compared with the theoretical temperature curve with the help of a brightness curve we made. We were establishing the preciseness of the method and what the possible reasons for the deviations were.

Keywords: Schlieren optics, free convection, convective boundary layer, air flow, temperature gradient

KAZALO

Povzetek.....	1
Kazalo slik.....	3
Kazalo tabel.....	3
Kazalo grafov	3
Uvod.....	1
Teoretični del	2
Leče in zrcala.....	2
Lom svetlobe	3
Schlieren efekt.....	4
Prenos toplote	5
Značilnosti mejne plasti pri naravni konvekciji ob navpični steni	6
Ekspperimentalni del.....	10
Oprema.....	10
Postavitvev	10
Beleženje podatkov.....	12
Rezultati.....	14
Merska napaka pri merjenju temperature.....	14
Izmerjene temperature.....	15
Hitost zračnega toka.....	15
Merska napaka pri merjenju debeline plasti.....	17
Debelina temperaturne mejne plasti	19
Primerjava temperaturne krivulje	22
Razprava	23
Izračun teoretične hitrosti.....	23
Izračun teoretične krivulje svetlostnega gradienta	24
Primerjava izmerjenih hitrosti s teoretičnimi	24
Primerjava izmerjenih svetlostnih krivulj s teoretičnim modelom.....	25
Zaključek	26
Literatura.....	27
Viri slik in grafov.....	28

KAZALO SLIK

SLIKA 1: Postavitev eksperimentalne opreme.....	5
SLIKA 2: Profil mejne plasti ob segreti navpični steni. (a) Hitrostni profil, (b) Temperaturni profil	6
SLIKA 3: Postavitev kamere, luči in rezila	11
SLIKA 4: Videoanaliza hitrosti potovanja motnje v programu Logger Pro	12
SLIKA 5: Območji merjenja debeline temperaturne mejne plasti - na višini 4 in 11 cm	13

KAZALO TABEL

TABELA 1: Meritve in izračuni temperatur	15
TABELA 2: Izmerjene hitrosti zraka v primerjavi s teoretičnimi	15

KAZALO GRAFOV

GRAF 1: Pogoji mejne plasti pri naravni konvekciji z laminarnim tokom ob izotermni segreti navpični steni. (a) Hitrostni profili, (b) Temperaturni profili	7
GRAF 2: Hitrost zraka pri temperaturi stene 57°C.....	16
GRAF 3: Primer meritve osvetljenosti posnetka v odvisnosti od razdalje od stene.....	17
GRAF 4: Grafi osvetljenosti v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri različnih ponovitvah pri enakih pogojih. Razlike med krivuljami kažejo na nenatančnost meritve	18
GRAF 6: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 43^\circ\text{C}$ na višini $x = 4$ cm	20
GRAF 7: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 43^\circ\text{C}$ na višini $x = 11$ cm.....	20
GRAF 8: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 57^\circ\text{C}$ na višini $x = 4$ cm	20
GRAF 9: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 57^\circ\text{C}$ na višini $x = 11$ cm.....	20
GRAF 10: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 69^\circ\text{C}$ na višini $x = 4$ cm	21
GRAF 11: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 69^\circ\text{C}$ na višini $x = 11$ cm.....	21
GRAF 12: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 82^\circ\text{C}$ na višini $x = 4$ cm	21
GRAF 13: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 82^\circ\text{C}$ na višini $x = 11$ cm.....	21
GRAF 14: Integral funkcije osvetljenosti posnetka (črne točke) v primerjavi s teoretično odvisnostjo temperature od oddaljenosti od stene.....	22

UVOD

V raziskovalni nalogi preizkuša sistem za opazovanje zračnih tokov in drugih pojavov, ki vplivajo na lomni količnik prozornega sredstva – tehniko, imenovano Schlieren. Ugotavlja, kakšne so možnosti uporabe te tehnike za fizikalne meritve in kako natančne kvantitativne podatke lahko izmerimo. Tehnika ponuja širok nabor zanimivih pojavov, ki jih lahko opazujemo. Nedavno so z njo preizkušali varnost zaščitnih mask, že dolgo pa ima pomembno vlogo na področju aerodinamike. Med drugim lahko opazujemo zvočno valovanje, kar nama je do neke mere tudi uspelo.

Po različnih poskusih sva za predmet raziskovanja izbrala naravno konvekcijo ob segreti navpični steni, natančneje značilnosti mejne plasti. V kombinaciji z dodatnimi merilnimi pripravami lahko s pomočjo te tehnike izračunamo toplotni tok kot posledico konvekcije ob steni. Schlieren efekt nam neposredno omogoča opazovanje temperaturnega gradienta ob robu stene in s pomočjo umetnih motenj v okolici stene tudi okvirne hitrosti zračnega toka. Zato sva si za cilj naloge zadala izmeriti hitrost zračnega toka in debelino temperaturne mejne plasti pri konvekciji ob navpični steni pri različnih temperaturah stene in na različnih višinah ter nato izmerjene podatke primerjati s teoretičnimi modeli.

Tehnika Schlieren je že dokaj stara. Najpomembnejše in glavno delo o njej je knjiga *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media* iz leta 2001 ameriškega profesorja G. S. Settles-a, kjer na strani 224 tudi omenja možnost preučevanja konvekcije z uporabo te tehnike. Konvekcija je pogost predmet opazovanja, tudi s pomočjo te tehnike, manj pogoste pa so tudi kvantitativne raziskave mejne plasti. Temperaturni in hitrostni profil mejne plasti pri konvekciji sta bila izmerjena z napredno tehnologijo, ki omogoča tudi zelo natančne meritve. Te se ujemajo s teoretičnim izračunom, ki ga je opravil ameriški profesor in raziskovalec Simon Ostrach in predstavil v delu *An analysis of laminar free-convection flow and heat transfer about a flat plate paralalled to the direction of the generating body force*, ki je izšlo leta 1953. Nekaj kvantitativnih raziskav je bilo opravljenih tudi s tehniko Schlieren, vendar le v kombinaciji z izredno natančnimi termočleni in interferometrom. V svoji raziskovalni nalogi bova uporabila le dva navadna termometra in računalniška orodja, zanima pa naju, kako natančne rezultate lahko pridobiva na ta način.

TEORETIČNI DEL

LEČE IN ZRCALA

Lom žarkov v lečah in odboj na zrcalih spadata v področje geometrijske optike. Po definiciji je žarek pravokotnica na valovno ploskev in označuje smer potovanja svetlobe. Za preučevanje poti žarkov pri prehodu skozi lečo ali pri odboju na zrcalu sta pomembna lomni in odbojni zakon.¹ Lomni zakon povezuje vpadni in lomni kot ter lomne količnike obeh snovi.

Lomni zakon zapišemo z enačbo $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$, pri čemer je α vpadni kot, β lomni kot, n_2 lomni količnik snovi, v katero se svetloba lomi, in n_1 lomni količnik snovi, iz katere svetloba prihaja.

Odbojni zakon, ki ga uporabljamo pri zrcalih, je preprostejši in narekuje le enakost vpadnega in odbojnega kota.

Po obliki lahko zrcala delimo na sferična in parabolična – sferična delujejo kot izsek velike krogle, katere središče je krivinsko središče. Parabolična zrcala imajo parabolično oblikovano površino, ki snop vzporednih žarkov zbere v gorišču.

V resnici imajo sferična zrcala le krivinsko središče in nimajo pravega gorišča, nasprotno pa imajo parabolična zrcala le gorišče. Vendar so te razlike pri velikih goriščnih razdaljah in majhnih premerih zrcal zanemarljive in je uporaba obeh vrst zrcal izmenljiva. V praksi je sferična zrcala težko najti, ker imajo parabolična zrcala širšo uporabo, na primer v teleskopih.

Nepravilnost paraboličnega zrcala na končni poskus vpliva tako, da na enem delu zrcala opazimo temnejše in na drugem delu svetlejše območje. Prav to je tudi ena od znamenitih slik, narejenih s tehniko Schlieren, ki jo je prvič posnel francoski fizik Léon Foucault.²

Ker je ta sprememba zelo majhna in enakomerno prehaja po površini zrcala, ne ovira opazovanja loma svetlobe.

¹ Mohorič, Aleš, idr. Fizika 3 učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Mladinska knjiga, 2017. Str. 118 – 121.

² Settles, Gary S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001, Springer, 2001. Str. 6.

LOM SVETLOBE

Lom svetlobe je fizikalni pojav, pri katerem pride do spremembe smeri širjenja svetlobnega valovanja ob prehodu med snovema z različnima lomnima količnikoma. Koliko se lomi, je odvisno od razmerja hitrosti širjenja valovanja med snovema in od vpadnega kota, pod katerim svetloba preide iz ene v drugo snov, kar lahko izračunamo z lomnim zakonom. Ob prehodu se ohrani frekvenca, hitrost in valovna dolžina pa se sorazmerno spremenita, kar je razvidno iz enačbe $c = \lambda\nu$, kjer je c hitrost širjenja valovanja, λ valovna dolžina in ν frekvenca valovanja. Pri lomnem zakonu lahko namesto razmerja hitrosti uporabimo tudi razmerje lomnih količnikov snovi, lomni količnik pa je definiran kot razmerje med hitrostjo širjenja svetlobe v vakuumu in hitrostjo širjenja svetlobe v določeni snovi, označimo ga z n . Torej je

$$n = \frac{c_0}{c}$$

kjer je c_0 hitrost svetlobe v vakuumu. Velja

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

pri čemer je n_2 lomni količnik snovi, v katero svetloba preide.³

Lomni količnik za pline je odvisen od gostote plina, kar se da opisati z enačbo Gladstone-Dale:

$$(n - 1) = k\rho$$

kjer je ρ gostota plina in k konstanta Gladstone-Dale, ki je odvisna od molekularne sestave plina.

Za zrak je ta približno

$$k_{zr} = 0,23 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

pri standardnih pogojih.⁴

S spremembo temperature pa se zraku spremeni prostornina, saj se ta s segrevanjem širi oz. z ohlajanjem krči. Masa pri tem ostane enaka in posledično se zraku spremeni gostota ter lomni količnik. Enačba za raztezek je $\Delta V = 3\alpha V \Delta T$, kjer je α temperaturni koeficient dolžinskega

³ Kladnik, Rudolf, in Božo Kos. *Fizika za srednješolce*. 2, 2., DZS, 2015. Str. 195-201.

⁴ Settles, Gary S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001, Springer, 2001. Str. 28.

raztezka, V začetna prostornina in ΔT sprememba temperature.⁵ Svetloba se v zraku lomi za tako majhne kote, da teh razlik s prostim očesom načeloma ne moremo zaznati, zato za opazovanje uporabimo tehniko Schlieren.

SCHLIEREN EFEKT

Tehnika, ki jo je prvič uporabil Robert Hooke leta 1665, omogoča opazovanje majhnih sprememb v smeri žarkov svetlobe. Izraz izvira iz nemške besede *Schliere*, v množini *Schlieren*, kar v tem kontekstu pomeni proge. S pomočjo te tehnike lahko opazujemo majhne krajevne spremembe lomnega količnika plinov ali tekočin ali nepravilnosti na optičnih elementih. Ker je lomni količnik odvisen od gostote in posledično od temperature ter tlaka plina, so opazne tudi majhne temperaturne in tlačne razlike, zato se tehnika pogosto uporablja v aerodinamiki. Hooke je pri svoji izvedbi uporabil zbiralno lečo in plamen sveče, ki je deloval kot vir svetlobe. Pred lečo je postavil drugo svečo, ki je ogrevala zrak, ki ga je opazoval. V ustaljeni obliki je tehniko po nekaterih idejah Jeana Léona Foucaulta zasnoval nemški fizik August Toepler leta 1864 in jo poimenoval z današnjim imenom.⁶

Učinek je mogoče doseči tako z uporabo leč kot zrcal. Najenostavnejša in najpogostejše uporabljena izvedba je z uporabo enega zbiralnega zrcala, iz zgoraj opisanih razlogov idealno sferičnega, a v praksi pogosteje parabolničnega. Pri tej postavitvi čim manjši vir svetlobe stoji nekoliko zamaknjen od krivinskega središča zrcala po pravokotnici optične osi. Svetloba se po odboju od zrcala spet zbere v točki, glede na optično os simetrično zamaknjeni od krivinskega središča kot vir svetlobe. V tej točki je postavljena britev ali rezilo noža, ki polovico žarkov zastre. Ko za nož postavimo zaslon ali fotoaparati, na njem opazimo sliko vira svetlobe. Dokler se žarki nikjer na poti ne lomijo, je slika enakomerno osvetljena. Če pa se žarki lomijo, del žarkov, ki se lomijo v smeri proti rezilu, ne doseže zaslona in je zato slika na tem delu temnejša. Prav tako se nekateri žarki lomijo stran od rezila in tisti del slike dodatno osvetlijo. Slika ne odraža neposredno lomnega količnika na določenem območju, temveč samo njegove spremembe – odvod v smeri,

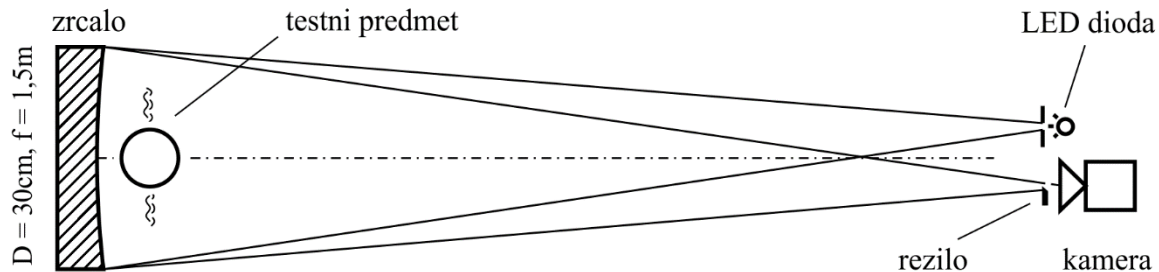
⁵ Kladnik, Rudolf, in Božo Kos. *Fizika za srednješolce*. 2, 2., DZS, 2015. 195-201.

⁶ „Schlieren“. *Wikipedia*, 1. december 2020, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlieren&oldid=991795290>.

pravokotni na rezila noža. Podobna tehnika z imenom sencografija deluje brez uporabe rezila in odraža drugi odvod lomnega količnika.⁷

Zaznati je možno že zelo majhne lomne kote – pri toplem zraku nad svečo se ti gibajo okoli $0,06^\circ$.⁸

V svoji raziskovalni nalogi sva uporabila postavitev, kot je prikazana na spodnji skici.



SLIKA 1: Postavitev eksperimentalne opreme

PRENOS TOPLOTE

Pri raziskavi sta bila ključna načina prenosa toplote konvekcija in prevajanje. Prevajanje poteka v trdnih snoveh in v tekočinah, kjer je prisoten temperaturni gradient in toplota prehaja s kraja z višjo temperaturo na kraj z nižjo temperaturo zaradi termičnega gibanja, konvekcija pa poteka le v tekočinah, saj se toplota prenaša s tokom tekočine. Konvekcijo delimo na naravno in vsiljeno. Pri naravni konvekciji tok tekočine nastane zaradi vzgona, ki deluje na del tekočine z drugačno gostoto. Segreta tekočina se zaradi manjše gostote dviga, ohlajena tekočina se spušča. Vsiljena konvekcija poteka, kjer je prisoten zunanji povzročitelj toka tekočine. Na oblikovanje mejne plasti ob trdni steni vplivata tako konvekcija kot prevajanje.⁹

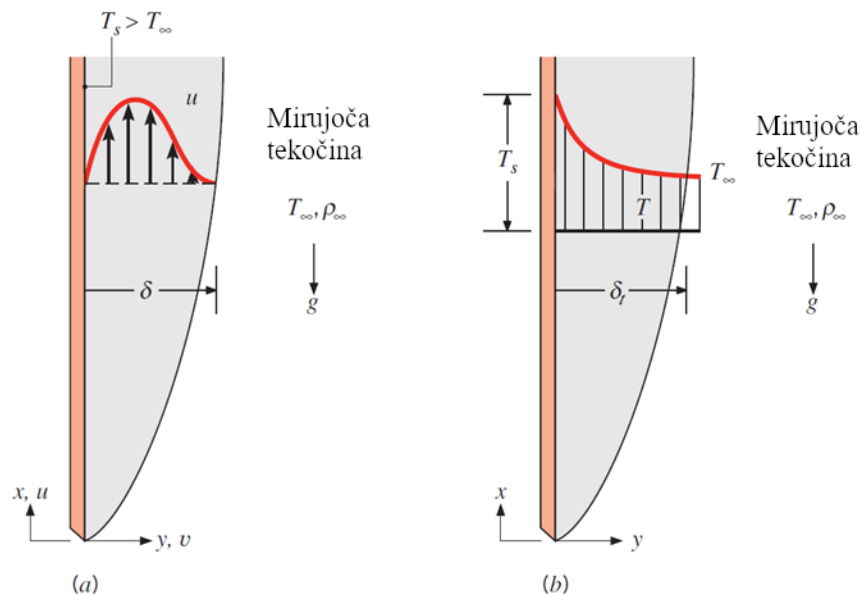
⁷ „Schlieren Photography“. *Wikipedia*, 14. januar 2021, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlieren_photography&oldid=1000323434.

⁸ Settles, Gary S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001, Springer, 2001. Str. 28.

⁹ Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 46; Breuer, Hans, idr. *Atlas klasične in moderne fizike*. Državna založba Slovenije, 1993. Str. 123.

ZNAČILNOSTI MEJNE PLASTI PRI NARAVNI KONVEKCIJI OB NAVPIČNI STENI

Pri mejni plasti nas zanima, kako se z oddaljenostjo od stene spreminjata temperatura zraka in hitrost zračnega toka. Ta dva profila lahko opišemo z analizo vzgona, gibalne količina, prevajanja, viskoznosti in energijskega toka. Temperatura zraka se postopoma, vendar ne linearno, zmanjšuje od temperature stene do temperature okoliškega zraka. Ta prehod imenujemo temperaturna mejna plast. Hitrost zraka je ob steni zaradi viskoznosti enaka nič, prav tako je pri naravni konvekciji (kjer zraka ne poganja zunanji dejavnik, kot je ventilator, veter, itd.) hitrost na zunanji strani hitrostne mejne plasti enaka nič. Na temperaturni in hitrostni profil mejne plasti vpliva temperaturna razlika med steno in okolico, navpični položaj opazovane ravnine (merjen relativno od dna stene) in značilnosti snovi.¹⁰



SLIKA 2: Profil mejne plasti ob segreti navpični steni. (a) Hitrostni profil, (b) Temperaturni profil

Skici prikazujeta hitrostni (u) in temperaturni (T) profil ob vroči steni. Kot je v literaturi o obravnavani temi običajno, bo v prihodnje y vodoravna razdalja od stene do opazovane točke, x

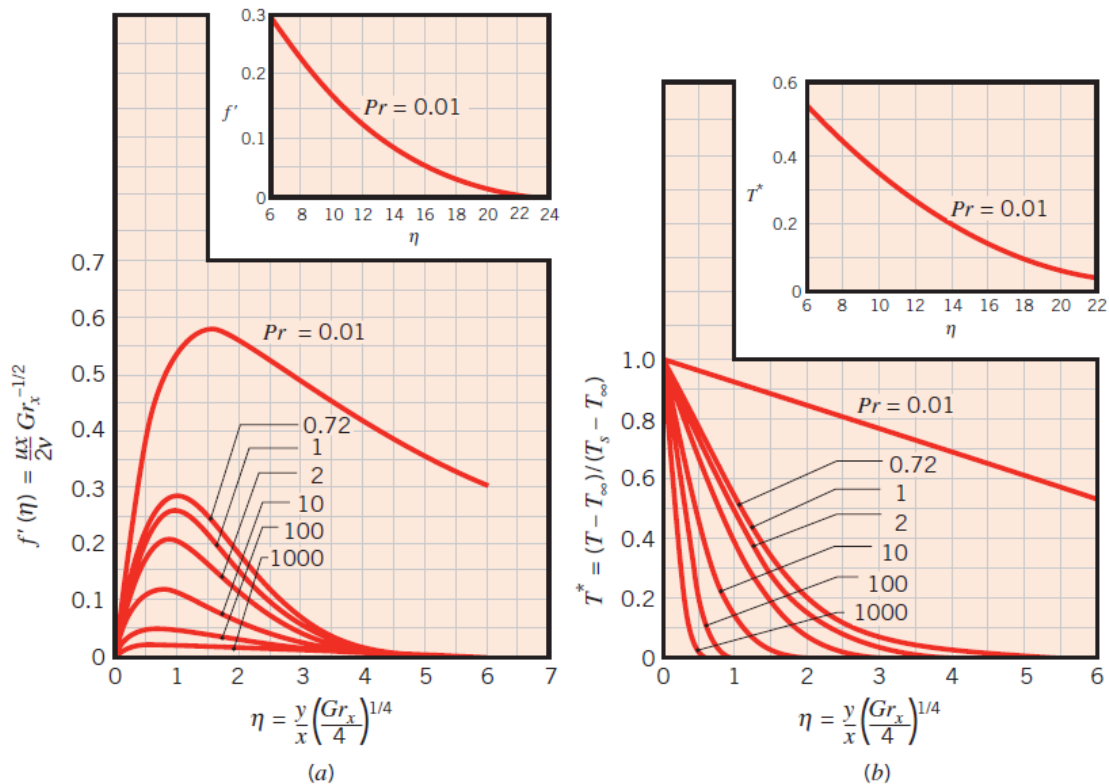
¹⁰ Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 599; Gradbena fizika, Zvonko Jaglicic, Fizika.si. <http://www.gradbena.fizika.si/>. Pridobljeno 22. februar 2021. Str. 17; Ostrach, Simon. „An Analysis of Laminar Free-Convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Paralleled to the Direction of the Generating Body Force“. UNT Digital Library, 1953, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc60470/m1/6/>.

pa navpična razdalja od začetka stene do opazovane točke. Prav tako je u hitrost zraka v navpični smeri, v pa v vodoravni (ta je v konkretnem primeru enaka nič).

Z rešitvijo diferencialnih enačb, ki pogojujejo gibanje in temperaturo zraka, je Simon Ostrach izpeljal tudi številske rešitve za hitrost in temperaturo v določeni točki. Te so predstavljene na spodnjih grafih.¹¹

GRAF 1: Pogoji mejne plasti pri naravni konvekciji z laminarnim tokom ob izotermni segreti navpični steni.

(a) Hitrostni profili, (b) Temperaturni profili



Na vodoravni osi je na obeh grafih število η , ki povezuje enake vrednosti krivulje pri različnih pogojih. Kot že povedano, je y vodoravna in x navpična koordinata. Gr_x je Grashofovo število na navpični razdalji x od dna stene, definirano z enačbo

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2}$$

¹¹ Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 600; Ostrach, Simon. „An Analysis of Laminar Free-Convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Paralleled o the Direction of the Generating Body Force“. *UNT Digital Library*, 1953, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc60470/m1/6/>.

pri čemer je g težnostni pospešek, β koeficient temperaturne razteznosti snovi, T_s temperatura stene, T_∞ temperatura zraka v okolici in ν kinematična viskoznost snovi, definirana kot razmerje med dinamično viskoznostjo in gostoto snovi. Na obeh grafih je narisanih več krivulj, vsaka primerna določeni vrednosti Prandtlovega števila, ki je definirano kot $\frac{\nu}{\alpha}$, kjer je ν kinematična viskoznost in α toplotna difuzivnost. Vrednost Prandtlovega števila za zrak je 0,72, zato tej vrednosti na grafu ustreza posebna krivulja.

Levi graf prikazuje vrednost funkcije $f'(\eta)$, ki pri določenih pogojih opisuje velikost navpične komponente hitrosti zračnega toka. Vrednost krivulje je enaka $\frac{ux}{2\nu\sqrt{Gr_x}}$, iz tega sledi, da lahko navpično komponento hitrosti u izračunamo kot zmnožek vrednosti $f'(\eta)$ z $\frac{2\nu\sqrt{Gr_x}}{x}$. Funkcijo navpične komponente hitrosti v določeni točki lahko torej zapišemo kot

$$u(y, x) = f' \left(\frac{y}{x} \sqrt{\frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{4\nu^2}} \right) \frac{2\nu\sqrt{\frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2}}}{x}$$

pri čimer za f' izberemo ustrezno krivuljo. V nadaljevanju bo pomembna tudi povprečna hitrost na določenem intervalu $(0, y_0)$ med steno in okolico, saj s tehniko Schlieren na predstavljeni način lahko razberemo le povprečno hitrost. To izračunamo enostavno kot

$$\bar{u} = \frac{1}{y_0} \int_0^{y_0} u(y) dy$$

Izračun temperature v določeni točki je nekoliko enostavnejši, ker krivulja na desnem grafu sama po sebi podaja razmerje med temperaturo stene in temperaturo okolice v izbrani točki – 1 predstavlja temperaturo stene, 0 pa temperaturo okolice.¹²

Schlieren efekt neposredno ne omogoča odčitavanja absolutne vrednosti temperature, temveč odraža le relativno vrednost njenega odvoda v smeri normale na rezilo noža¹³ – pri predpostavki,

¹² Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 600.

¹³ Settles, Gary S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001, Springer, 2001. Str. 29.

da je temperatura edini faktor, ki vpliva na lomni količnik zraka. Na tem mestu je teoretični model nekoliko poenostavljen, saj namesto cilindrične oblike opazovane posode uporabljamo teoretični model ravne stene. Zaradi tega vrednost odvoda temperature kot funkcije oddaljenosti od posode ni povsem sorazmerna z opaženo osvetljenostjo na posnetku, med drugim tudi, ker kamera pri digitalnem zapisu posnetka uporablja določene svetlostne krivulje. Vsekakor pa bi se morala ujemati razdalja med začetkom in koncem temperaturnega prehoda, ki je neodvisna od točne oblike krivulje.

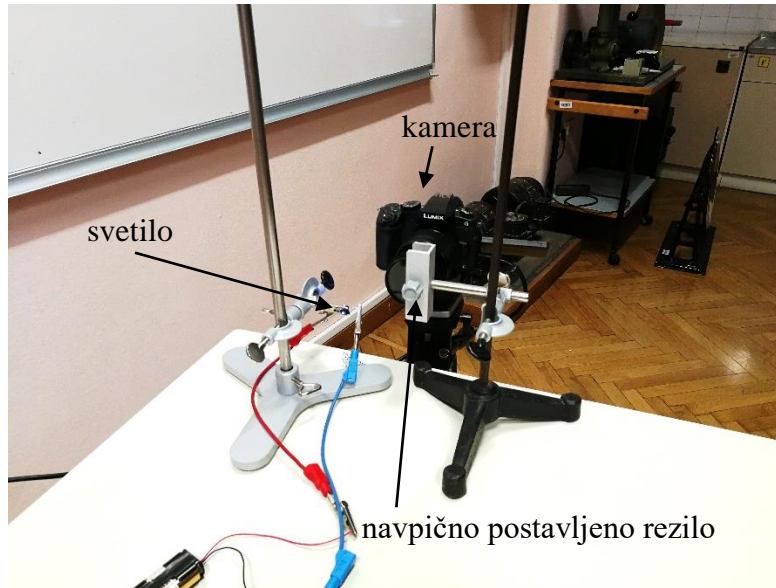
EKSPERIMENTALNI DEL

OPREMA

- parabolično zrcalo za teleskope (premer $D = 300$ mm, goriščna razdalja $f = 1500$ mm)
- LED dioda (3,2V, 20cd, 22°)
- britev
- črn lepilni trak
- fotoaparati, 135 mm objektiv
- stojala
- čaša
- trije termometri za uporabo z vmesnikom LabQuest
- LabQuest vmesnik
- termalna pasta
- program Logger Pro

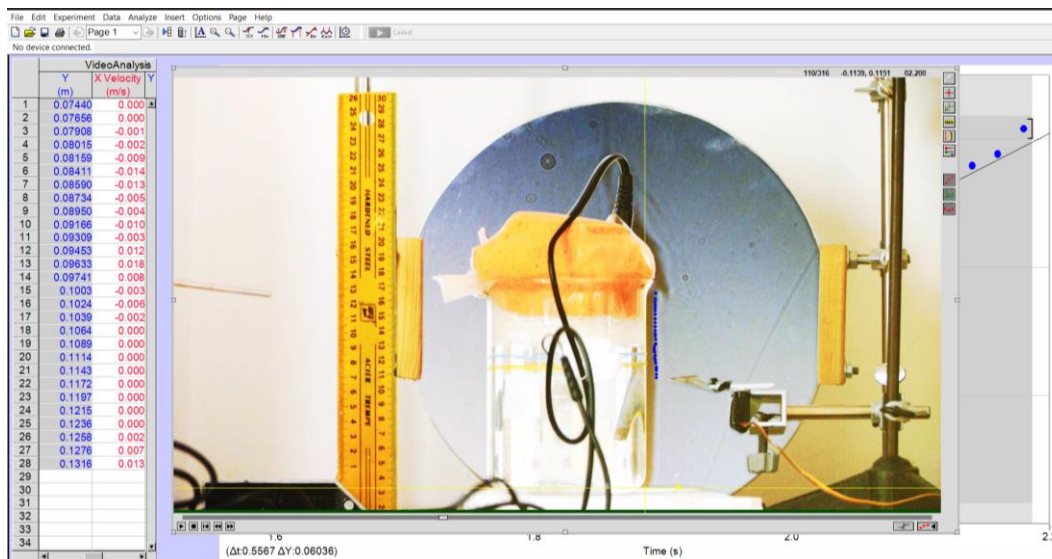
POSTAVITEV

Na mizo sva postavila dve stojali, prvo je držalo LED diodo, prelepljeno s črnim lepilnim trakom z majhno luknjo, tako da je bil vir svetlobe čim manjši. V drugo stojalo je bilo vpeto rezilo, ki je prekrilo polovico svetlobe, odbite od zrcala. Za rezilom je stala kamera, s katero sva posnela dogajanje.



SLIKA 3: Postavitev kamere, luči in rezila

Tri metre (dvakratnik goriščne razdalje) oddaljeno od vira svetlobe je stalo parabolično zrcalo. Pred zrcalom je na stiroporu stala čaša, napolnjena z vročo vodo. Na steno čaše je bil s termalno pasto pritrjen termometer, dodatno prekrit z vato, da sva zmanjšala vpliv zraka v okolici z nižjo temperaturo. V vodi ob robu stene čaše je bil pritrjen drug termometer, ki je meril temperaturo vode. Približno 40 cm stran pa je stal še tretji termometer, ki je meril temperaturo zraka v sobi. Poleg čaše sva na stojalo pritrdila tudi rezilo, povezano na servomotor, ki sva ga lahko upravljala na daljavo, tako da nisva motila zračnega toka okoli čaše. Rezilo in servomotor sva uporabila za povzročanje nepravilnosti v toku zraka ob čaši, ki sva jih nato opazovala in z njihovo pomočjo določila okvirno hitrost potovanja segretega zraka. Poleg čaše je bilo postavljeno tudi merilo, ki sva ga uporabila za določanje razdalj na posnetkih. Vsi termometri so bili preko LabQuest vmesnika povezani na računalnik in so podatke prikazali v programu Logger Pro. Tam sva beležila temperature in kasneje opravila videoanalizo.



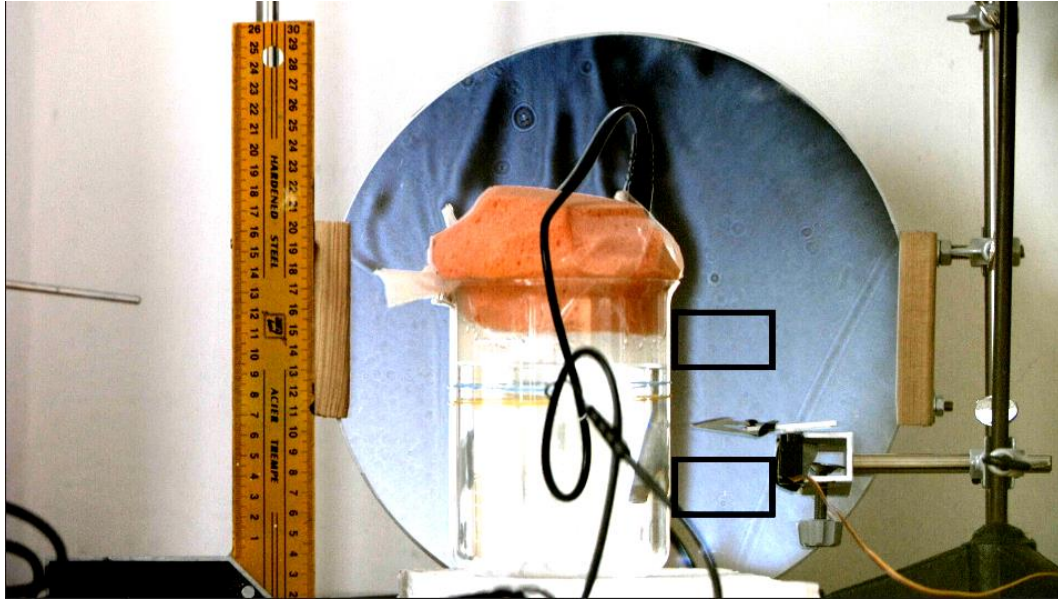
SLIKA 4: Videoanaliza hitrosti potovanja motnje v programu Logger Pro

BELEŽENJE PODATKOV

Temperature sva v minutnem intervalu beležila v programu Logger Pro na desetinko stopinje natančno. Na vsakih 10°C padca temperature stene posode sva s kamero naredila videoposnetek, na katerem je posneto gibanje ustvarjene motnje v zračnem toku. Kamera snema 50 slik na sekundo, resolucija posnetkov pa je 1920x1080 slikovnih pik. Posnetke sva naredila pri izmerjenih temperaturah stene 70°C, 60°C, 50°C in 40°C. Na koncu sva naredila še dodaten, testni posnetek, na katerem sva motnjo v zračnem toku naredila ob dnu posode. Namen tega posnetka je spremljanje hitrosti na različnih višinah.

Hitrost potujoče motnje je bila odčitana v programu Logger Pro. Z orodji za videoanalizo sva spremljala vodoravno in navpično koordinato motnje in iz povprečnega naklona navpične koordinate po času izračunala hitrost.

Debelino plasti oziroma profil temperaturnega gradienta sva izmerila iz osvetljenosti posnetka na dveh različnih višinah.



SLIKA 5: Območji merjenja debeline temperaturne mejne plasti - na višini 4 in 11 cm

S programskim orodjem DaVinci Resolve, ki je v osnovi namenjeno barvni obdelavi videoposnetkov, lahko izrišemo graf svetlosti barvnih pik v odvisnosti od vodoravne razdalje y . Skala tega grafa nima absolutnih vrednosti, zato moramo izračunati potrebno povečavo posnetka, da se enote na merilu ujemajo z enotami na skali grafa. Izračunala sva ustrezno povečavo, da ena enota na skali grafa ustreza enemu milimetru. Graf osvetljenosti se izriše glede na vidno območje posnetka, zato sredino tega poravnamo z izbrano višino x . Zgornja slika prikazuje izseka, na katerih so bili izrisani grafi.

REZULTATI

MERSKA NAPAKA PRI MERJENJU TEMPERATURE

Merjenje temperature stene posode se je izkazalo za problematično, saj termometer meri hkrati tudi temperaturo zraka. Kljub dodani prevodni pasti in toplotni izolaciji termometra je meritev vprašljiva, zato sva jo preverila z dodatnim poskusom. Izmerila sva temperaturo vode ob steni posode, zgornjo odprtino posode sva zaprla s plastično folijo in penasto gumo, da bi čim boljše preprečila izhlapevanje in prehajanje toplote skozi zgornji del posode. Pod posodo sva položila debelo plast stiropora. Tako večina toplote prehaja skozi stene posode in mora biti toplotni tok, ki ga oddaja voda, enak toplotnemu toku, ki prehaja skozi stene posode. Meritev temperature vode v notranjosti posode je gotovo natančnejša od meritve temperature na zunanjem robu, zato lahko približno temperaturo stene posode izračunamo.

Povprečen toplotni tok, ki ga oddaja voda v posodi, je

$$P = \frac{m_v c_v \Delta T}{\Delta t}$$

kjer je m_v masa vode v posodi, c_v specifična toplota vode, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ pa sprememba temperature po času.

Z izmerjenimi podatki je ta enak

$$P = \frac{0,74 \text{ kg } 4200 \text{ J } 1 \text{ K}}{360 \text{ s } \text{ kg } \text{ K}} = 8,6 \text{ W}$$

(v čaši je bilo 0,74 kg vode, ki se je v šestih minutah shladila iz 47°C na 46°C). Toplotni tok, ki teče skozi stene posode, je $P = \lambda \frac{T_v - T_s}{d} S$, kjer je λ koeficient toplotne prevodnosti stekla, d debelina posode, $T_v - T_s$ razlika med temperaturo stene oz. temperaturo vode na notranji in na temperaturo stene na zunanji strani, S pa je površina posode. Iz tega sledi, da je razlika med temperaturo vode in temperaturo stene posode enaka

$$\Delta T = \frac{Pd}{\lambda S} = \frac{8,6 \text{ W } 0,003 \text{ m}^2 \text{ K}}{1,05 \text{ W } 0,03 \text{ m}^2} = 0,8 \text{ K}$$

V primerjavi z izmerjeno razliko je ta zelo majhna, razlika v izmerjeni temperaturi je namreč večja od 10K. To pomeni, da je termometer na steni posode le delno meril temperaturo stene in v veliki meri temperaturo zraka. Ker je ta merska napaka pomembna, bo v prihodnje predpostavljeno, da je izračunana temperatura stene posode natančnejša od izmerjene in bo

namesto izmerjene uporabljena ta. Ker se toplotni tok s časom le malo spreminja, je v primerjavi z veliko mersko napako sprejemljivo, da v vsakem trenutku predpostavimo, da je temperatura stene enaka temperaturi vode minus eno stopinjo Celzija: $T_s = T_v - 1K$. Pred začetkom meritve so bili vsi trije termometri dvajset minut na isti temperaturi in so kazali temperaturo v okviru 1K natančno, to je torej tudi absolutna napaka meritve temperature zraka in vode.

IZMERJENE TEMPERATURE

TABELA 1: Meritve in izračuni temperatur

Izmerjena temperatura stene [°C]	Temperatura zraka T_∞ [°C]	Temperatura vode T_v [°C]	Izračunana temperatura stene T_s [°C]
70,0	22,3	83,3	82
60,0	22,3	69,8	69
50,1	22,4	57,7	57
40,1	22,6	43,8	43

HITOST ZRAČNEGA TOKA

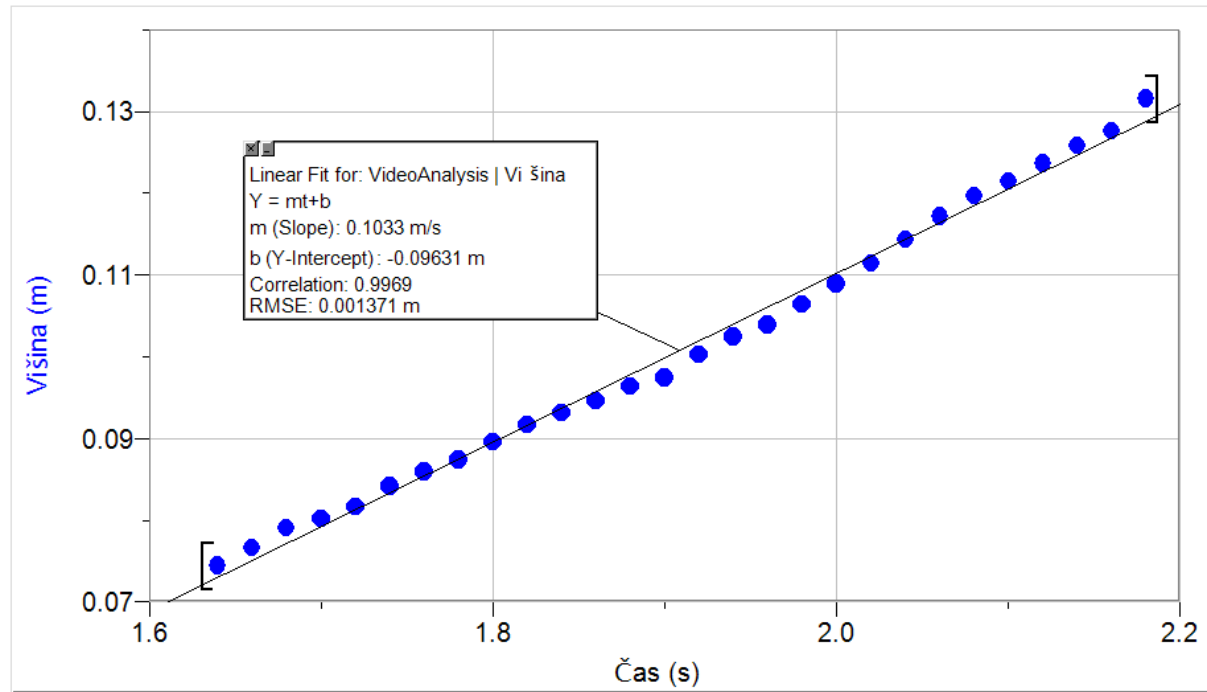
V tabeli so meritve hitrosti zračnega toka pri različnih temperaturah stene. Vsaka meritev je ponovljena trikrat, na desni pa so predvidene teoretične vrednosti.

TABELA 2: Izmerjene hitrosti zraka v primerjavi s teoretičnimi

Temperatura stene T_s [°C]	Izmerjene hitrosti zraka u [$\frac{m}{s}$]			Povprečna izmerjena hitrost zraka \bar{u} [$\frac{m}{s}$]	Teoretična hitrost zraka u_t [$\frac{m}{s}$]
	1	2	3		
43	0,095	0,099	0,101	0,098±0,005	0,092
57	0,109	0,103	0,107	0,106±0,005	0,12
69	0,125	0,130	0,135	0,130±0,005	0,13
82	0,143	0,140	0,141	0,141±0,005	0,14

Graf prikazuje navpične koordinate motnje v toku zraka, s pomočjo katere sva izmerila hitrost. Naklon premice predstavlja hitrost zraka.

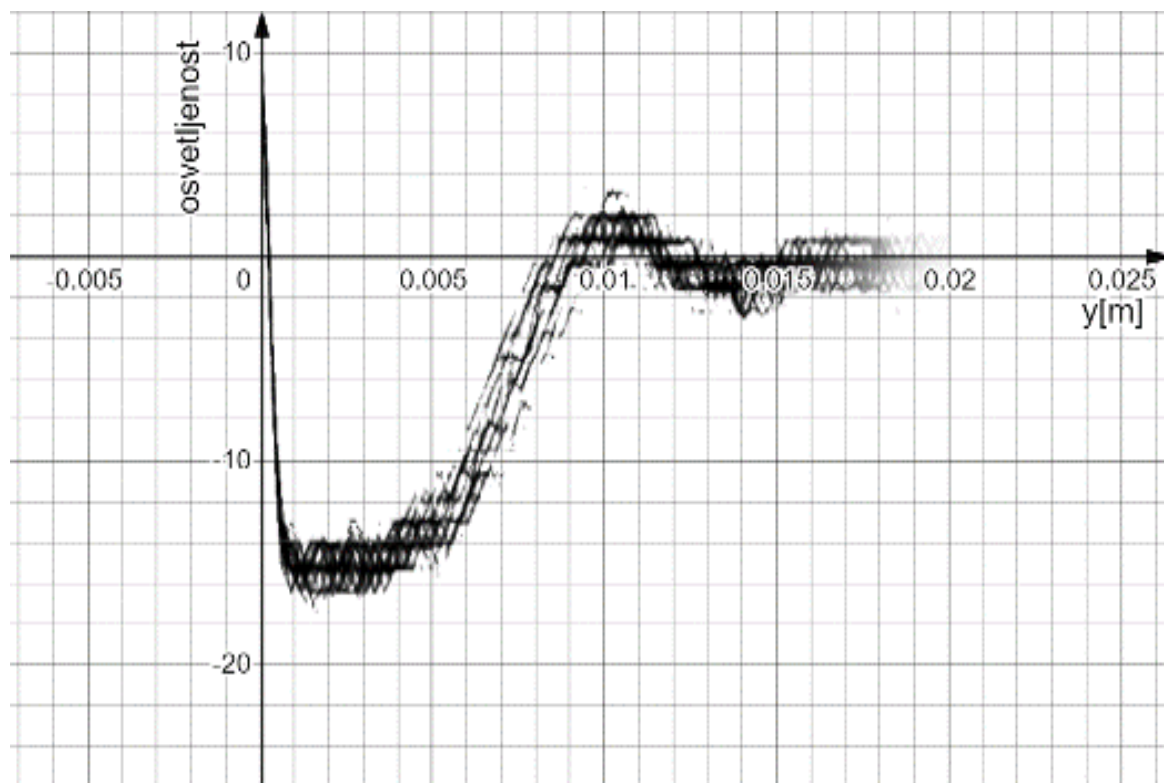
GRAF 2: Hitrost zraka pri temperaturi stene 57°C



MERSKA NAPAKA PRI MERJENJU DEBELINE PLASTI

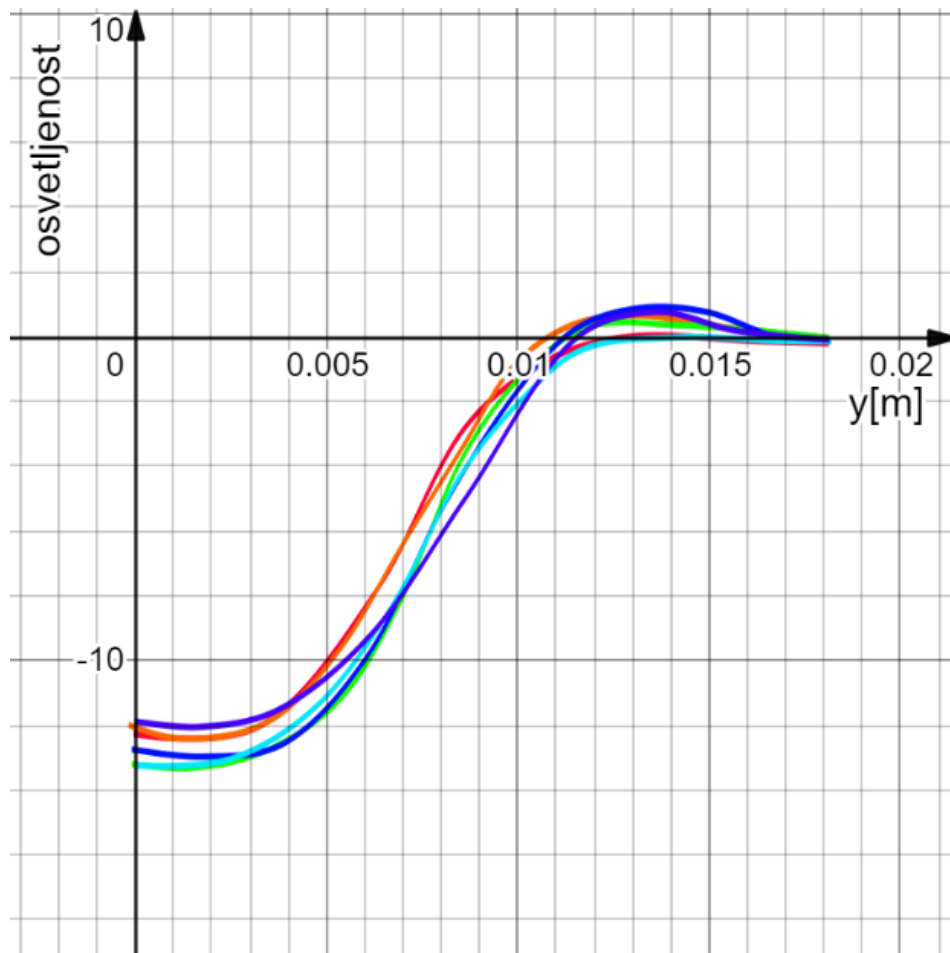
Debelino temperaturne mejne plasti sva, kot razloženo v teoretičnem uvodu, odčitala iz osvetljenosti videoposnetka. Za lažjo in natančnejšo predstavitev te meritve, sva pri različnih pogojih iz videoposnetka izrezala izsek in s pomočjo programa izrisala graf osvetljenosti posnetka na tem izseku v odvisnosti od razdalje od stene y . Grafi, pridobljeni na ta način, so podobni spodnjemu:

GRAF 3: Primer meritve osvetljenosti posnetka v odvisnosti od razdalje od stene



Da bi preverila ponovljivost meritev debeline plasti, sva naredila sledečo primerjavo. Spodnje krivulje različnih barv prikazujejo odvisnost osvetljenosti od oddaljenosti od stene na isti višini in pri isti temperaturi, a pri šestih različnih časih v roku pol minute. Razlika med dolžinami krivulj v smeri y predstavlja absolutno napako meritve debeline temperaturne mejne plasti v milimetrih. Iz spodnjih grafov sva absolutno napako ocenila na 2 mm, relativno pa na 15%.

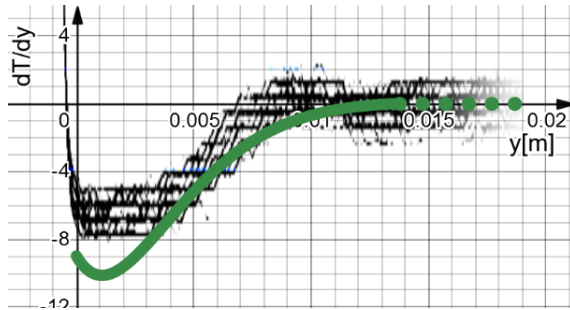
GRAF 4: Grafi osvetljenosti v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri različnih ponovitvah pri enakih pogojih. Razlike med krivuljami kažejo na nenatančnost meritve



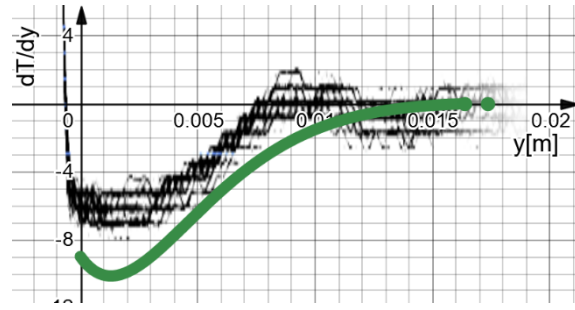
DEBELINA TEMPERATURNE MEJNE PLASTI

Spodnji grafi prikazujejo izmerjene grafe osvetljenosti v odvisnosti od oddaljenosti od stene. Zelena krivulja predstavlja teoretično krivuljo osvetljenosti, ki je sorazmerna z odvodom funkcije temperature v odvisnosti od oddaljenosti od stene (gl. poglavje Rezultati: Izračun teoretične krivulje svetlostnega gradienta). Rezultati so prikazani za štiri različne temperature stene, pri vsaki sta ustvarjena dva grafa osvetljenosti na različnih navpičnih višinah od dna stene, $x = 4$ cm in $x = 11$ cm.

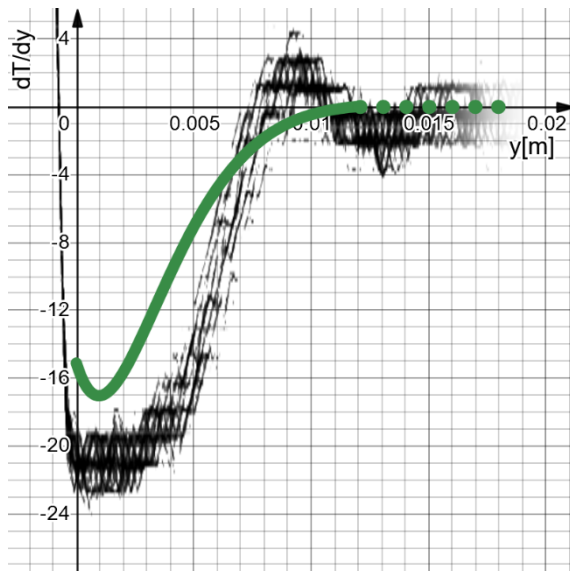
GRAF 5: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 43^\circ\text{C}$ na višini $x = 4\text{ cm}$



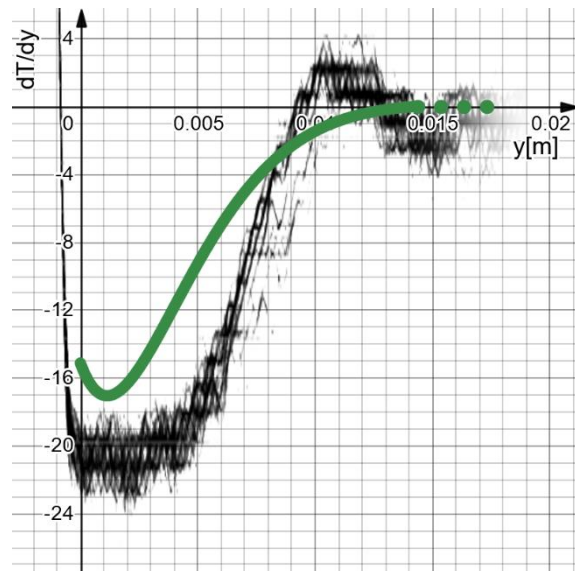
GRAF 6: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 43^\circ\text{C}$ na višini $x = 11\text{ cm}$



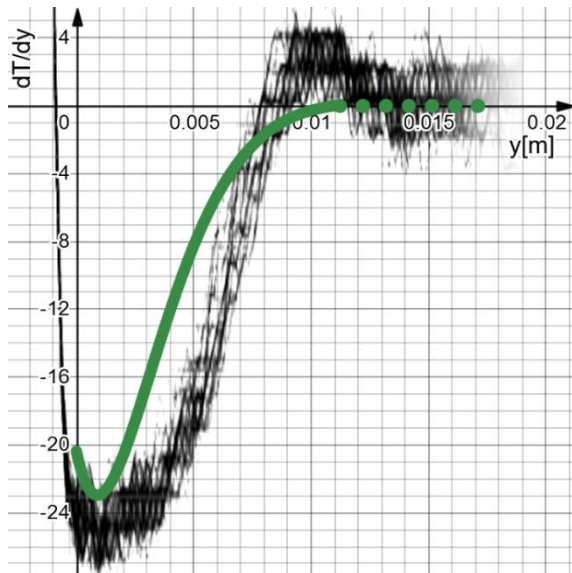
GRAF 7: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 57^\circ\text{C}$ na višini $x = 4\text{ cm}$



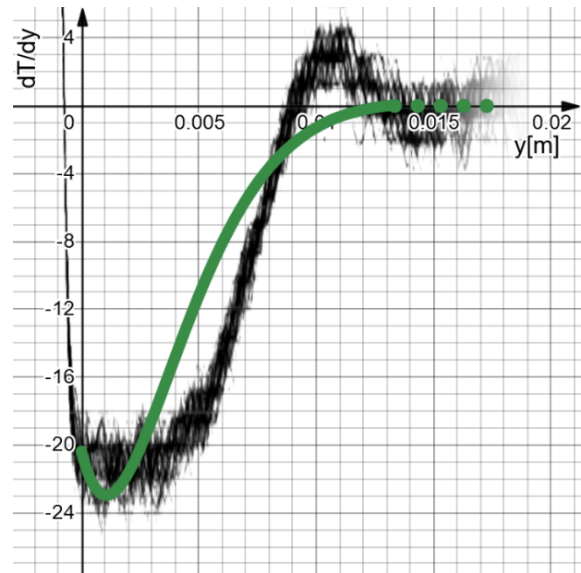
GRAF 8: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 57^\circ\text{C}$ na višini $x = 11\text{ cm}$



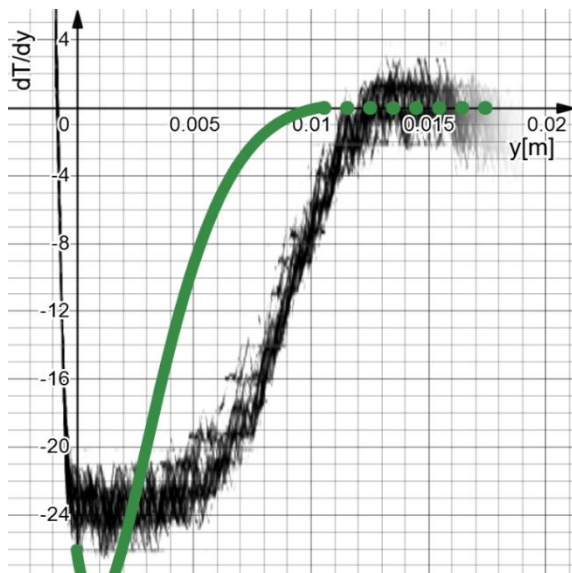
GRAF 9: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 69^\circ\text{C}$ na višini $x = 4\text{ cm}$



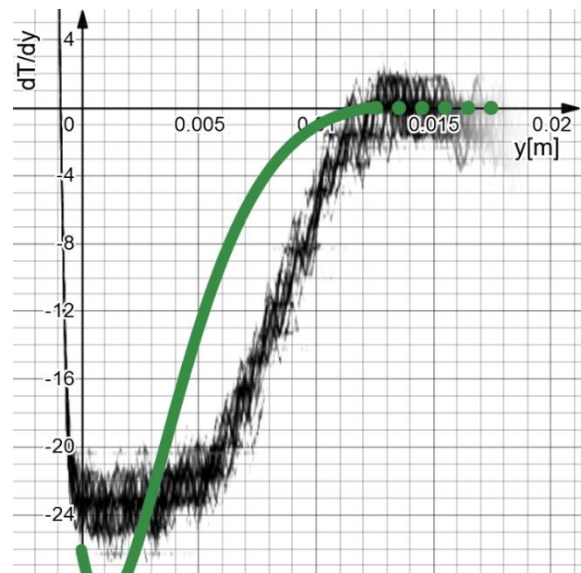
GRAF 10: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 69^\circ\text{C}$ na višini $x = 11\text{ cm}$



GRAF 11: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 82^\circ\text{C}$ na višini $x = 4\text{ cm}$



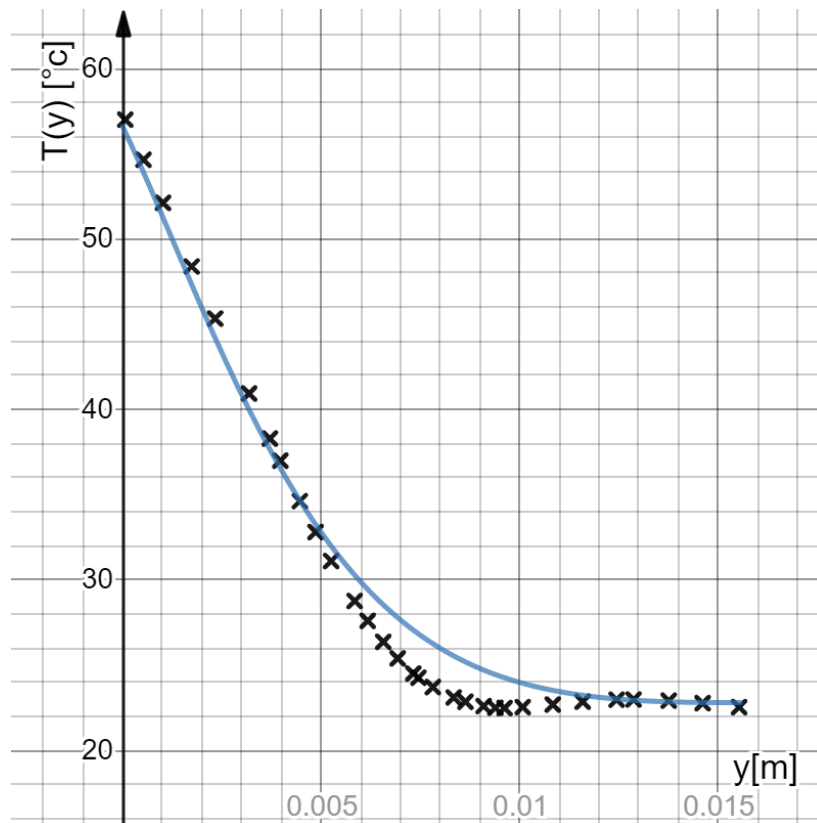
GRAF 12: Funkcija osvetljenosti posnetka (črna) v primerjavi z odvodom teoretične funkcije temperature (zelena) v odvisnosti od oddaljenosti od stene pri temperaturi stene $T_s = 82^\circ\text{C}$ na višini $x = 11\text{ cm}$



PRIMERJAVA TEMPERATURNE KRIVULJE

Kot primer je na spodnjem grafu prikazana še obratna primerjava. Ker se oblika funkcije osvetljenosti posnetka teoretično ujema s krivuljo odvoda lomnega količnika oz. temperature, naj bi integral funkcije osvetljenosti predstavljal obliko temperaturnega profila. Svetlostno krivuljo videoposnetka sva v programu Logger Pro z orodji za analizo slik pretvorila v tabelo točk, nato pa vrednosti z vgrajenimi funkcijami integrirala po razdalji y . Črne točke predstavljajo integral funkcije osvetljenosti posnetka v odvisnosti od y , raztegnjen v navpični smeri, da se začetna vrednost ujema s temperaturo stene, končna pa s temperaturo zraka. Modra krivulja je teoretična temperaturna krivulja pri teh pogojih. Primer je narejen za temperaturo stene 57°C in višino $x = 11\text{ cm}$.

GRAF 13: Integral funkcije osvetljenosti posnetka (črne točke) v primerjavi s teoretično odvisnostjo temperature od oddaljenosti od stene



RAZPRAVA

IZRAČUN TEORETIČNE HITROSTI

Pri primerjavi izmerjenih podatkov s teoretičnim modelom sva si pomagala z računalniškim orodjem Desmos, saj bi bili ročni izračuni zamudni. Najprej sva krivulji temperaturnega in hitrostnega profila za $Pr = 0,72$ pretvorila v matematični zapis – krivulji sta le narisani v knjigi, njunih enačb pa ne poznamo. Zato sva si ponovno pomagala z orodjem Logger Pro, tako da sva krivulji z orodji za analizo slik spremenila v tabelo točk, nato pa z računalniškim algoritmom poiskala matematično funkcijo, ki danim točkam najbolj ustreza – polinom pete stopnje za hitrostno krivuljo in eksponentno dušena sinusna funkcija za temperaturno krivuljo. Te funkcije nimajo nikakršnega fizikalnega pomena, njihov edini namen je verodostojna predstavitev krivulje na območju grafa za nadaljnjo analizo.

Krivuljo hitrostnega profila za Prandtlovo število 0,72 sva v nadaljnjem zapisala kot

$$f'(\eta) = -0,001409 + 0,7142\eta - 0,6155\eta^2 + 0,2057\eta^3 - 0,03128\eta^4 + 0,001808\eta^5;$$

$$0 \leq \eta < 5$$

Za začetek sva v program vstavila to funkcijo $f'(\eta)$, ki pa sama po sebi še ne poda hitrosti. Funkcijo hitrosti, kot že omenjeno, lahko izračunamo tako, da vrednosti funkcije f' pomnožimo s konstantami, značilnimi za opazovano območje, torej je $u(\eta) = \frac{f'(\eta)2\nu\sqrt{Gr_x}}{x}$. Da na abscisni osi namesto števila η opazujemo y , razdaljo od stene, kar je za dani primer precej bolj smiselno, zapišemo η kot funkcijo v odvisnosti od y , torej $\eta(y) = \frac{y}{x} \left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{\frac{1}{4}}$, kjer so vsa števila razen y konstante za opazovano območje. Hitrost v odvisnosti od razdalje nato zapišemo kot kompozitum funkcij, nakar dobimo končno funkcijo $u(y) = \frac{f'(\eta(y))2\nu\sqrt{Gr_x}}{x}$. Temperaturo stene in okolice ter x nastavimo kot parametre, pri katerih program izriše graf.

Iz posnetkov je razvidno, da hitrost motnje ne odraža ene same hitrosti $u(y)$ na razdalji y , ampak neko povprečno hitrost \bar{u} , saj se plasti zraka med ustvarjanjem motnje premešajo. Empirično sva ugotovila, da je za izračun te povprečne hitrosti najprimernejši interval od nič do šestih in pol milimetrov od stene, kar tudi ustreza območju, kjer je motnja ustvarjena. Kot parameter x je bila

vstavljen višina 7 cm, saj je na tej višini stal nož, ki je povzročal motnjo. Teoretične hitrosti pri danih pogojih so torej izračunane kot $\bar{u} = \frac{\int_0^{0,0065m} u(y)dy}{0,0065m}$.

IZRAČUN TEORETIČNE KRIVULJE SVETLOSTNEGA GRADIENTA

Po enakem postopku kot za hitrostno krivuljo sva temperaturni padec zapisala z enačbo

$$T^*(\eta) = 1,228e^{-0,8960\eta} \sin(0,5742\eta + 0,9116) + 0,01749; \quad 0 \leq \eta < 5.$$

Za ponazoritev teoretične krivulje, kot že omenjeno, je uporabljen odvod temperature krivulje. To temelji na dejstvu, da na kameri opazujemo prostorski odvod lomnega količnika v smeri y. Če je torej temperatura edini oz. najpomembnejši faktor, ki na lomni količnik vpliva, in je ta zveza sorazmerna, bi moral odvod temperature krivulje ustrezati svetlostni krivulji na kameri. Ker je pri odvodu pomembna tudi absolutna vrednost temperature, ker vpliva na strmino, a sicer ne tudi na razdaljo, je odvajana krivulja absolutne vrednosti temperature v K.

Krivulja absolutne temperature je v programu Desmos zapisana kot $T(y) = T^*(\eta(y))(T_s - T_\infty) + T_\infty$, zelena krivulja na grafih pa predstavlja $T'(y)$. Ordinatna os nima enot, ker so te v primeru osvetljenosti nepomembne, saj ne moremo izraziti neposredne zveze med vrednostjo odvoda in osvetljenostjo, zapisano v digitalnem barvnem prostoru. Grafi osvetljenosti so zato raztegnjeni v navpični smeri, tako da omogočajo lažjo primerjavo debeline plasti. Parametri, kot je navpični razteg, so pri vseh grafih enaki in niso dodatno prilagojeni. Med posameznimi grafi je bil spremenjen samo parameter temperature stene in višine x za izris ustrezne teoretične krivulje, vsi ostali parametri pa so med posameznimi grafi konstantni.

PRIMERJAVA IZMERJENIH HITROSTI S TEORETIČNIMI

Med izmerjenimi in teoretičnimi hitrostmi ni velikega odstopanja, razen pri temperaturi stene 57°C. Razlog za odstopanje je, da sva po nesreči pomaknila rezilo dlje od posode in motnja odraža povprečno hitrost na drugem intervalu y. Interval, na katerem je izračunana povprečna teoretična hitrost, je sicer tak, da se teoretične vrednosti najbolje ujemajo z izmerjenimi, je pa pri vseh temperaturah enak. Glede na posnetek je območje šestih milimetrov od stene smiselno, saj je na tem intervalu najvidneje ustvarjena motnja.

Potrebno je omeniti, da bi pričakovala, da bi hitrosti s časom oz. višino naraščale, ker se teoretične vrednosti hitrosti z višino x povečujejo, v praksi pa se to ni izkazalo. Meniva, da je razlog za to v tem, da sva v resnici merila hitrost motnje in ne samega zračnega toka. Vrtinec, ki je nastal z motnjo, je mešal topli zrak pri posodi in hladni zrak okolice. S tem mešanjem se je povečala gostota, zato se sila vzgona ni povečevala. Prav tako je iz posnetkov razvidno, da se motnja z višino oddaljuje od stene posode. Ker se hitrost v točki z oddaljenostjo od stene zmanjšuje, se povečanje hitrosti zaradi višine odšteje z zmanjšanjem zaradi oddaljevanja od stene.

PRIMERJAVA IZMERJENIH SVETLOSTNIH KRIVULJ S TEORETIČNIM MODELOM

Grafi osvetljenosti posnetkov se z izjemo zadnjih dveh, pri temperaturi stene 82°C , dobro ujemajo s teoretičnimi krivuljami. Debelina plasti se s teoretično ujema z največjim odstopanjem 4 mm pri 82°C na 4 cm višine, kar predstavlja napako 30%. V primerjavi z izmerjeno napako meritve $\pm 15\%$ je to odstopanje v okviru pričakovanega. Čeprav so grafi osvetljenosti v osnovi raztegnjeni za določen faktor v navpični smeri, da se ujemajo z velikostnim redom teoretične krivulje, je presenetljivo, kako sorazmerno se ta razteg spreminja z raztegom teoretične krivulje. Pri 43°C je ujemanje krivulj v navpični smeri skoraj popolno, pri 82°C pa razteg v navpični smeri odstopa za približno 30%, kar je relativno majhna napaka, glede na to, da na obliko svetlostne krivulje vpliva še veliko drugih dejavnikov, kot so objektiv, senzor fotoaparata in programska oprema. V tem pogledu je posebno zanimiva primerjava integrala svetlostne krivulje s teoretično temperaturno krivuljo – ujemanje je precej dobro, ne glede na drugačno obliko osnovne svetlostne krivulje.

Odstopanje od predvidenih rezultatov se kaže predvsem v odvisnosti debeline plasti od temperaturne razlike. Po teoretični osnovi bi morala debelina plasti z naraščanjem temperaturne razlike padati. Te odvisnosti pri izmerjenih rezultatih ne opazimo, debelina plasti ostaja konstantna oz. se s temperaturo celo malo večja. Vzroka tega odstopanja zaenkrat ne vidiva, vsekakor pa bi ga bilo z več meritvami pri več različnih temperaturah in v stabilnejših pogojih lažje odkriti.

ZAKLJUČEK

Meniva, da je metoda Schlieren dovolj natančna za okvirno merjenje hitrosti in debelin zračnih tokov različnih temperatur ter podobnih meritev, kjer pride do spremembe lomnega količnika zraka in ni zahtevan visok nivo natančnosti. S to tehniko je možno dobiti dokaj kvalitetne kvantitativne podatke, čeprav je nabor možnosti za opazovanje omejen, poleg tega pa dobimo tudi dobro vizualno predstavo dogajanja. Omogoča nam opazovanje stvari, ki jih s prostim očesom ne moremo opazovati, in nam tako olajša razumevanje pojavov.

V nadaljnjem raziskovanju bi lahko stremeli k bolj natančnemu merjenju hitrosti s pomočjo motnje, ki ne bi povzročila mešanja različnih plasti. Hitrost bi lahko merili tudi na daljši razdalji in pri več temperaturah. Za natančnejšo analizo bi si lahko prizadevali za natančnejše merjenje temperatur, predvsem temperature stene. Pri teoretičnem modelu bi lahko npr. upoštevali še vpliv ukrivljenosti stene na lom žarkov, kar sva zaradi lažjega izračuna zanemarila.

LITERATURA

- Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011.
- Breuer, Hans, idr. *Atlas klasične in moderne fizike*. Državna založba Slovenije, 1993.
- „Convection“. *Wikipedia*, 17. februar 2021, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=&oldid=1007354279>.
- Gradbena fizika*, Zvonko Jaglicic, *Fizika.si*. <http://www.gradbena.fizika.si/>. Pridobljeno 22. februar 2021.
- Kladnik, Rudolf, in Božo Kos. *Fizika za srednješolce*. 2, 2., DZS, 2015.
- Mohorič, Aleš, idr. *Fizika 3 učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol*. Mladinska knjiga, 2017.
- Ostrach, Simon. „An Analysis of Laminar Free-Convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Paralled to the Direction of the Generating Body Force“. *UNT Digital Library*, 1953, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc60470/m1/6/>.
- „Schlieren“. *Wikipedia*, 1. december 2020, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlieren&oldid=991795290>.
- Schlieren Optics*. <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/schlieren-optics>. Pridobljeno 15. februar 2021.
- „Schlieren Photography“. *Wikipedia*, 14. januar 2021, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlieren_photography&oldid=1000323434.
- „Schlierenfotografie“. *Wikipedia*, 22. maj 2020, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlierenfotografie&oldid=200197599>.
- Seeing the Invisible: SLOW MOTION Schlieren Imaging - YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=4tgOyU34D44>. Pridobljeno 15. februar 2021.
- Settles, Gary S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001, Springer, 2001.

VIRI SLIK IN GRAFOV

SLIKA 2: Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 596.

GRAF 1: Bergman, T. L., in Frank P. Incropera, uredniki. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed, Wiley, 2011. Str. 601.