ИСПИТИВАЊЕ НАСТУПА ТЕРМИЧКЕ НЕСТАБИЛНОСТИ У ПОЛУТРАНСПАРЕНТНИМ ЗИДОВИМА ЗА СКЛАДИШТЕЊЕ ТОПЛОТНЕ ЕНЕРГИЈЕ

INVESTIGATION OF THERMAL UNSTABILITY ONSET IN SEMITRANSPARENT WALLS FOR HEAT ENERGY STORAGE

Љиљана Симић, Марија Тодоровић, Франц Коси и Раде Миленковић, Лабораторија за термодинамику и термотехнику Пољопривредног факултета, Београд

Мерењем су испитиване појаве претварања енергије сунчевог зрачења и простирања топлоте у композитном зиду, састављеном од транспарентних и полутранспарентних слојева различитих материјала є два слоја стакла са слојем воде између њих. Посебно је испитиван утицај интензитета и упадног угла сунчевог зрачења у спрези са термофизичким особинама слоја течности на услове наступа природне конвекције у слоју течности. Одређена су одговарајућа подручја вредности Ra-бројева и њихов утицај на динамику топлотног претварања и пренос топлоте. Резултати испитивања су упоређени са резултатима примене досад презентираних модела функционалих зависности Nu-бројева од Ra и Pr-бројева.

Phenomena of energy conversion of solar radiation and heat transport in composite walls consisting of transparent and semitransparent layers of different materials – two layers of glass with a water layer between, have been experimentally studied. Investigation of the influence of solar radiation intensity and incident angle in conjuction with the thermophysical properties of liquid on the natural convection onset on thin water layer, has been conducted. Determined are relevant values of Ra-numbers and influence of those on the dynamics of energy conversion and heat transport. Experimental results are compared with the results obtained by the application of earlier presented models of Nu-number functional dependence on Ra and Pr-numbers.

***Кључне речи**: сунчева енергија; композитни зид; природна конвекција; пренос топлоте*
***Key words**: solar energy; composite wall; natural convection; heat transfer*

1. Увод

Динамичко понашање зграде, као одговор на промену вредности параметара спољашње средине, одређено је у првом реду термичким особинама, обликом и конструкцијом зидова – омотача зграде. Оно заправо представља пасивну реакцију зграде на деловање спољних сила (интензитета сунчевог зрачења, температуре и влажности спољног ваздуха и правца и брзине ветра) и у исто време одређује динамику топлотних губитака и топлотних добитака објекта као и потребе осветљења, што опет даље одређује енергетске потребе објекта за грејањем или хлађењем, односно

климатизацијом. Према томе, од особина зидова омотача зграде зависи не само понашање објекта као пасивног система коришћења сунчеве енергије, већ и динамика промена позитивних и негативних топлотних оптерећења система КГХ објекта у целини. Стога прилаз конструкцији омотача зграде мора да задовољи низ захтева, поред оног основног – обезбеђења жељене унутрашње климе.

За пројектовање и конструкције добро планираног објекта, а посебно енергетски ефикасног омотача зграде, неопходно је добро разумевање значаја утицаја меродавних термофизичких особина зидова омотача и спреге појава преноса и претварања енергије у њима на динамику енергетског понашања појединих делова односно појединачних соба објекта. Прилог унапређењу овог разумевања је био циљ предузетог испитивања преноса енергије сунчевог зрачења и простирања топлоте у полупрозрачним зидовима за складиштење топлотне енергије – испуњеним течним флуидом. Овакав зид се може наћи као елемент непосредно омотача објекта, или као складишни елемент у подсистему Тромбеовог зида, или осунчаног простора односно стакленика.

2. Поставка проблема

Предмет испитивања је модел вертикалног зида, који се састоји од два слоја стакла између којих је слој течности. На једну страну зида делује сунчево зрачење, а друга страна зида је адијабатски изолована. Део упадног сунчевог зрачења на спољну површину се рефлектује у атмосферу, део се апсорбује у спољним стакленом слоју, а највећи део се пропушта. Овај пропуштени део се делом апсорбује у слоју течности, а остатак се опет делом рефлектује од другог слоја стакла, а делом апсорбује у истом. С обзиром да је коефицијент рефракције воде (1,33) сличан коефицијенту рефракције стакла (1,5), може се сматрати да је рефлексија сваке међуповршине течност/стакло довољно мала да се може занемарити. Апсорбовано зрачење доводи до повећања унутрашње енергије слојева стакла и течности, што доводи до повишења њихове температуре.

И стакло и течност (вода у до сада спроведеним испитивањима) имају сличну особину спектралне зависности пропустљивости зрачења, односно добро пропуштају сунчево зрачење, а у много мањој мери дуготаласно нискотемпературно зрачење. Резултат ове спреге појава је успостављање одређеног режима претварања енергије сунчевог зрачења у топлотну енергију, пораста температуре стакла и воде и одавања топлоте спољној средини нискотемпературним зрачењем и кондукцијом, односно конвекцијом са спољне површине стакленог слоја. Зависно од величине успостављеног градијента температуре на унутрашњим површинама зидова стакла, у слоју воде се одвија провођење топлоте – кондукција односно комбиновано простирање топлоте кондукцијом и конвекцијом. Зависно од динамике промене интензитета сунчевог зрачења, режим овог процеса може да буде мање или више близак квазистационарном, при устаљеном сунчевом зрачењу ведрих дана, односно изразито динамичан процес при скоковитим променама сунчевог зрачења у данима са променљивом облачношћу.

Појаве које се одигравају у слојевима стакла и воде током овог процеса су

добро познате. Међутим, док су оне за слој стакла и мерно-технички добро одређене [7], за апсорпцију сунчевог зрачења у слоју воде и спрегу простирања топлоте зрачењем и кондукцијом, а посебно сâм наступ природне конвекције у слоју течности при том, не спадају још у довољно добро испитане порцесе. Прецизно утврђивање услова наступа термичке нестабилности у слоју воде и почетка формирања вртложних конвективних ћелија, односно одређивање интензитета комбинованог преноса топлоте кондкуцијом и зрачењем је од изузетног значаја за прорачуне топлотних губитака, топлотних добитака, односно одређивање динамике пуњења и пражњења и укупне енергетске ефикасности зида за складиштење топлотне енергије. Резултати спроведених испитивања су дати у облику ефективних вредности коефицијената провођења топлоте, критеријалних зависности Ra-бројева, и Nu-бројева, као и коефицијената прелаза топлоте конвекцијом за утврђене режиме успостављене природне конвекције.

3. Експериментални прилаз

Основе постављеног физичког модела зида су приказане на сл. 1. Опитни систем представља композитни зид са водом која испуњава простор између две вертикалне стаклене плоче у дрвеном раму. Једна страна је изложена дејству сунчевог зрачења, а друга је у додиру са површином слоја топлотне изолације (адијабатна гранична површина). Простор између стакала је величине 11 mm. Рам је направљен од дрвета димензија 400 x 400 x 100 mm. Стакла су обична, прозорска, дебљине 3 mm и димензија 360 x 360 mm. Распоред температура у зиду је нестационаран, али се у краћим временским интервалима може сматрати квазистационарним. Просторно се проблем посматра као једнодимензиони и једини правац промене температуре и простирања топлоте је нормалан на дебљину зида. Предмет посматрања су следеће величине: I_G – интензитет глобалног сунчевог зрачења у равни површине спољашњег слоја стакла; $Q_{\lambda a}$ – губици провођењем и конвекцијом, Q_z – губици зрачењем према спољној средини. Губици провођењем са стране постављене изолације $Q_{\lambda i}$ се сматрају довољно малим да их можемо занемарити и одговарајућу страну композитног зида посматрати приближно адијабатном. Воду посматрамо као тело које апсорбује делимично инфрацрвено зрачење, а стакло да не пропушта инфрацрвено зрачење. Мерењем су обухваћене следеће величине: интензитет и упадни угао сунчевог зрачења – I_G (соларимeтром Kipp & Zonen, тип Moll–Gorczyski), и температуре свих паралелних приближно изотермских површина стакла – T_{sr1}, T_4, T_{sr2}, T_5 (све мерено термопаровима Cr-Ni-Cr). Пријем података мерења и контрола опита је вођена системом Hewlett Packard (HP 3421A/HP9000 серија 300). Коефицијенти који карактеришу поједине облике простирања топлоте се одређују као квазиконстанте везане за поједине приближно стационарне периоде, односно као променљиве у ширем опсегу процеса и датих температура.

Експериментално одређивање вредности коефицијената прелаза топлоте је спроведено путем мерења температура "квазиизотермијских" површина стакла у додиру са слојем воде, односно на основу изједначавања топлотног протока провођења кроз слој стакла са топлотним протоком

ефективног преноса топлоте кондукцијом уз присуство или без присуства конвекције и зрачењем између два слоја стакла кроз слој воде на додирној површини стакла и воде:

$$q = \frac{\lambda_{st}}{\delta_{st}} \cdot \left|T_4 - T_{sr1}\right| = \alpha \cdot \left(T_5 - T_4\right) + \tau_w \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot \left[\left(T_5/100\right)^4 - \left(T_4/100\right)^4\right]$$

$$\alpha = \frac{\frac{\lambda_{st}}{\delta_{st}} \cdot \left|T_4 - T_{sr1}\right| - \tau_w \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot \left[\left(T_5/100\right)^4 - \left(T_4/100\right)^4\right]}{\left(T_u - T_f\right)} \qquad (1)$$

где су:

q (W/m^2) – топлотни проток,
λ_{st} (W/mK) – коефицијент проводљивости топлоте стакла,
$T_{sr1,tsr2}$ (K) – температуре приближно изотермијских површина стакла према (сл. 2),
$T_{4,5}$ (K) – температуре површине стакла у додиру са слојем воде,
σ (W/m^{2}K4) – константа зрачења апсолутно црног тела.

При израчунавању вредности топлотног протока провођења узета је у обзир квазистационарност процеса линеаризацијом промене температуре граничне површине у одређеним "кратким" интервалима времена према [6]. Резултати мерења карактеристичних температура су приказани на дијаграму (сл. 2), а одговарајуће вредности ефективних коефицијената прелаза топлоте на сл. 3.

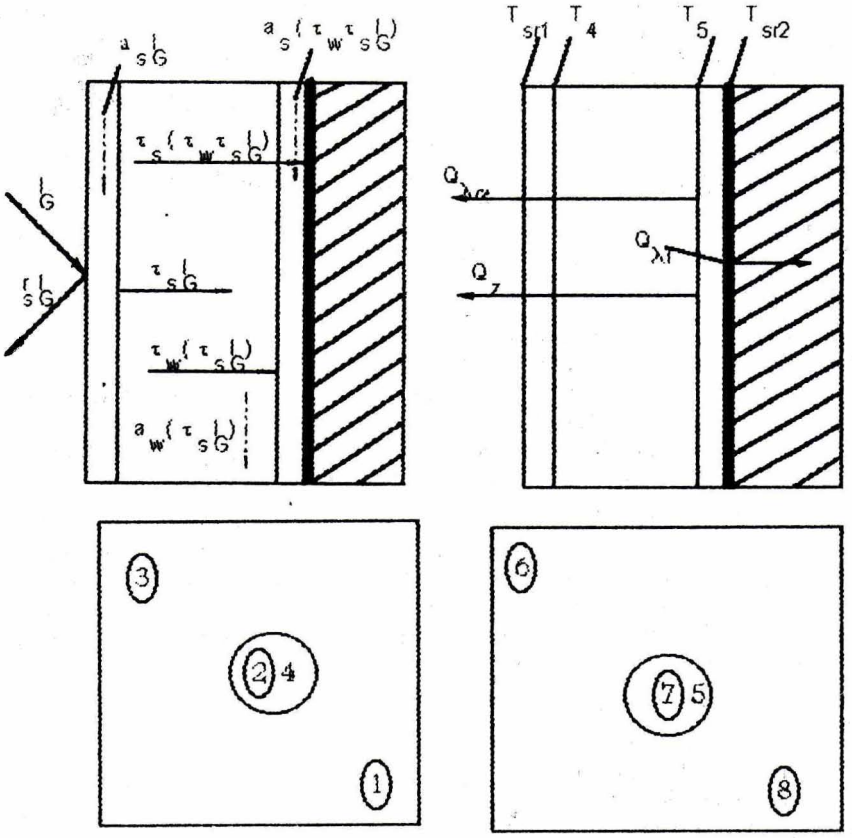
Спроведена испитивања обухватају следеће:

Pr – број од 3,2 до 7,8;
Ra – број од 0 до 130,000;
Nu – број од 0,5 до 3;
– температуре воде од 25 до 60°C;
– интензитети глобалног сунчевог зрачења у равни зида од 590 до 810 W/m^2.

4. Модели за одређивање Nu–бројева

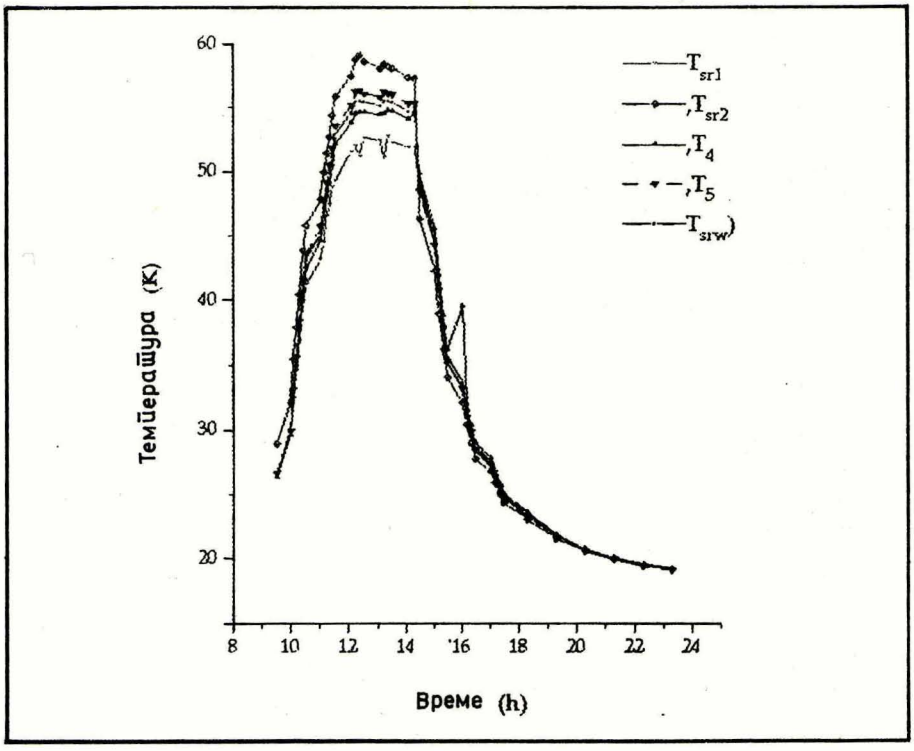
У испитиваном моделу вертикалног зида са слојем воде између стакла, на који с једне стране делује сунчево зрачење, а друга страна је адијабатски изолована, апсорпција дела упадног сунчевог зрачења доводи до повећања унутрашње енергије односно повишења температуре слојева и успостављања процеса одавања топлоте спољној средини провођењем, конвекцијом и дуготаласним нискотемпературним зрачењем. У средишту нашег посматрања су слој воде и појаве трансформације и преноса енергије у њему.

Зависно од полажаја зида (вертикалан или нагнут под одређеним углом) и успостављеног градијента температуре и кондукције, у слоју воде може доћи и до појаве термичке нестабилности и успостављања природне конвекције, што повећава интензитет простирања топлоте. То је повољно за период корисног одавања топлоте у циљу грејања унутрашњег простора, али потпуно непожељно у периоду пуњења односно чувања ускладиштене



Слика 1. Физички модел ћелије зида са слојем течности: а) пренос енергије сунчевог зрачења a_{sw} – коефицијент апсорпције стакла, воде, r_s – коефицијент рефлексије стакла, $\tau_{s,w}$ – коефицијент пропустљивости стакла, воде, I_G – интензитет глобалног сунчевог зрачења; б) протоци губитака топлоте Q_2 – губици зрачењем према спољној средини, $Q_{\lambda k}$ – губици провођењем и конвекцијом, Q_k – губици провођења са стране постављене изолације, T_{sr1} – средња темп. на предњем стаклу са спољашње стране, T_{sr1} – средња темп. на задњем стаклу са спољашње стране, $T_{4,5}$ – темп. стакла у додиру са слојем воде; ц) мерна места температура; мерна места на предњем стаклу 1, 2 и 3 су мерна места са предње стране стакла, а 4 је мерно место са задње стране стакла. Мерна места на задњем стаклу 6, 7 и 8 су мерна места са задње стране стакла, а 5 је мерно место са предње стране стакла

топлотне енергије. Зато без доброг разумевања и ефективне контроле меродавних појава у овом слоју течности није могуће остварење енергет-



Слика 2. Дијаграм промене температуре у функцији времена

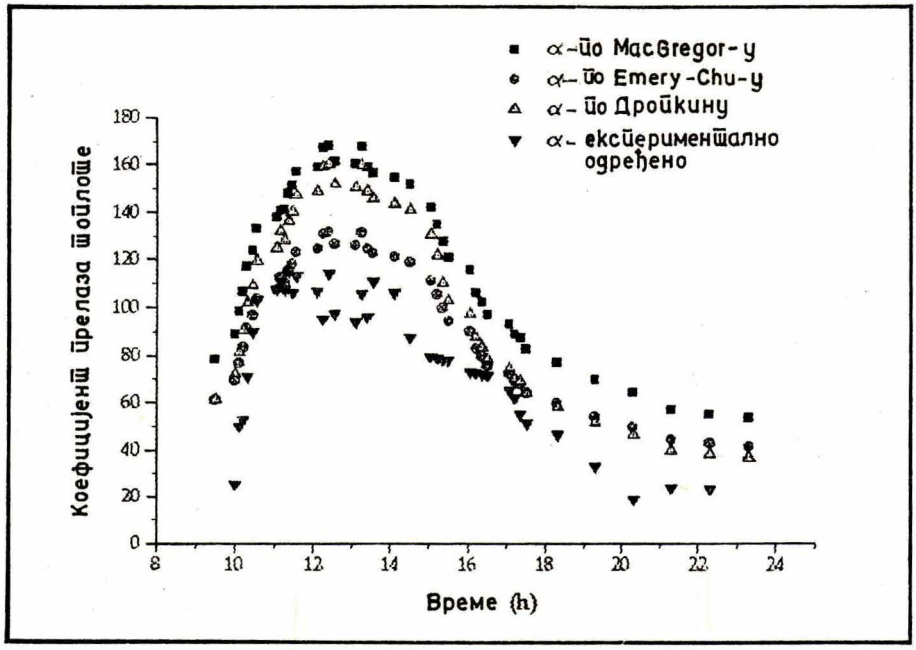
ски ефикасне функције складишног зида. Појава природне конвекције унутар одређеног простора је сложен проблем флуидног система, који се може решавати, поред експерименталног, и аналитичким односно нумеричким путем.

Посматрамо систем на сл. 1, у коме се слој течности налази у простору између две равне плоче. У складу са датом разликом температуре, две паралелне изотермијске површине слоја воде у додиру са површинама стакла успостављају се и различити режими преноса топлоте од чисте кондукције у непокретном слоју течности, преко прелазног режима наступа нестабилности све до изражене комбиноване кондукције и природне турбулентне конвекције [3]. При том се законитост промене режима може повезати са бездимензионом критеријалном зависношћу Ra–броја:

$$Ra = G_r \cdot P_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot |T_5 - T_4|}{v^2} \cdot \frac{a}{v} \qquad (2)$$

где су:

β (1/K) – коефицијент запреминског ширења,
v (m^2/s) – кинематска вискозност,



Слика 3. Дијаграм промене коефицијента прелаза топлоте у функцији времена

a (m^2/s) – температурска проводност,
g (m^2/s) – убрзање Земљине теже,
δ (m) – дебљина слоја воде између два зида,
T_5 (K) – температура на унутрашњој површини задњег стакла,
T_4 (K) – температура на унутрашњој површини предњег стакла.

Карактеристична температура флуида за величине β, v, a је средња температура $t_{srw} = (t_4 + t_5)/2$. Са порастом Ra-броја расту Nu-бројеви, све док достизање Nu > 1 не означи придруживање конвекције кондукцији. Успостављена конвекција је у почетку ламинарна, а са даљим повећањем градијента температуре у Ra-бројева флуидни систем улази у нови прелазни режим ка турбулентној конвекцији. Премда су бројна питања још увек отворена за одређивање Nu-броја, за вертикалан слој течности се према Mac Gregor-у и Emery-у [10] може применити израз:

$$Nu = 0{,}42 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0{,}25} \cdot Pr^{0{,}012} \cdot (L/\delta)^{-0{,}30}$$
$$10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7$$
$$1 < Pr < 20$$
$$1 < L/\delta < 40 \qquad (3)$$

за услове ламинарног струјања, док за услове турбулентног струјања исти аутори дају израз:

$$Nu = 0{,}046 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3}$$
$$10^6 < Gr \cdot Pr < 10^9$$
$$1 < Pr < 20$$
$$1 < L/\delta < 40 \qquad (4)$$

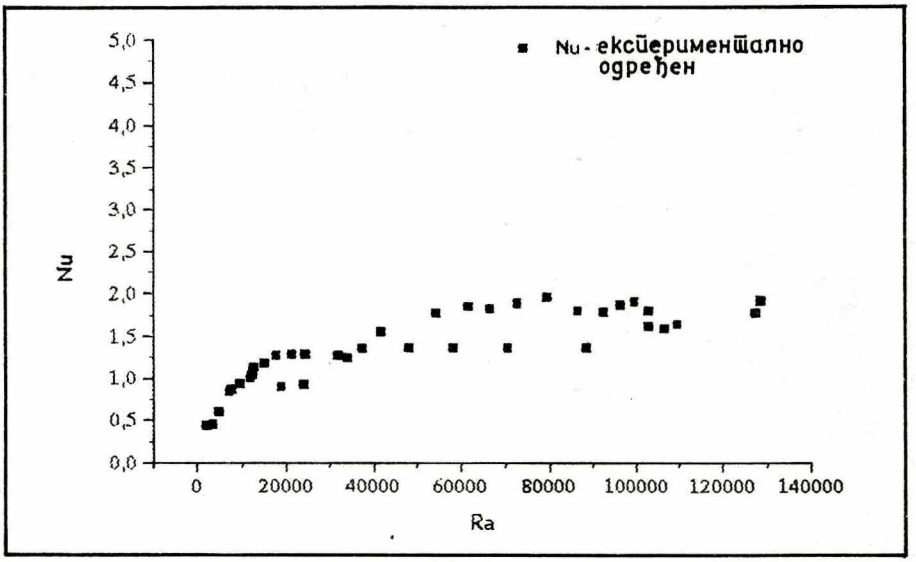
где је L(m) висина посматраног модела.

Према изразу (4), утицај Pr-броја и односа L/b је мали у турбулентном режиму. Одсуство утицаја Pr-броја за турбулентни режим је за очекивати, с обзиром да се у турбулентном режиму топлота и моменат преноса моларним струјањем флуида, док је у ламинарном режиму доминантан пренос путем молекуларне дифузије. Чак и за ламинаран ток је видљиво да је осетљивост с обзиром на Pr-број веома мала.

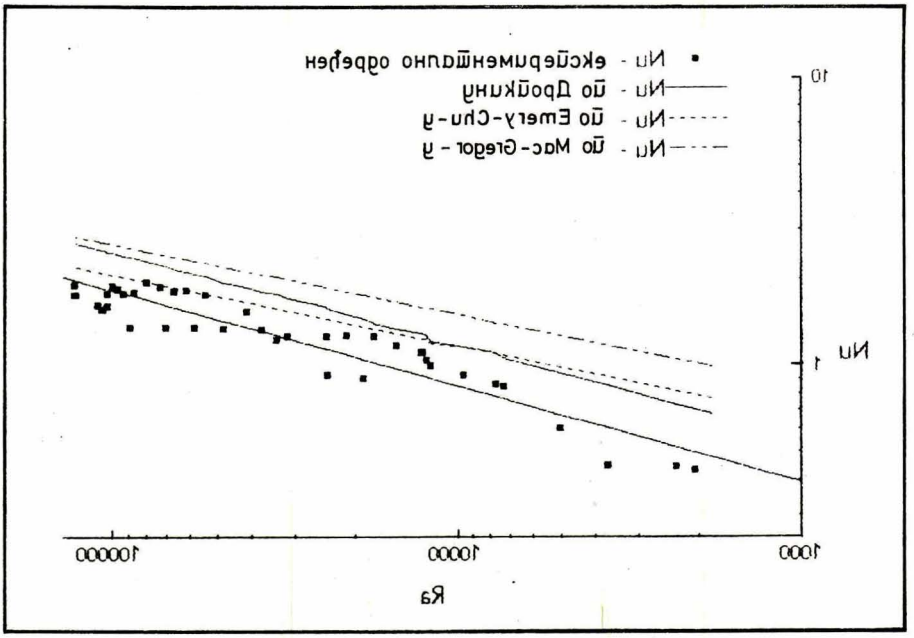
За исту геометрију слоја течности нагнуту под различитим угловима, укључујући и 90 су Dropkin и Somerscales дали следећу зависност:

$$\text{za } \Theta = 90^o \quad \text{i} \quad 5 \cdot 10^4 < Gr \cdot Pr < 2{,}5 \cdot 10^8$$
$$Nu = 0{,}049 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \cdot Pr^{0{,}074} \qquad (5)$$

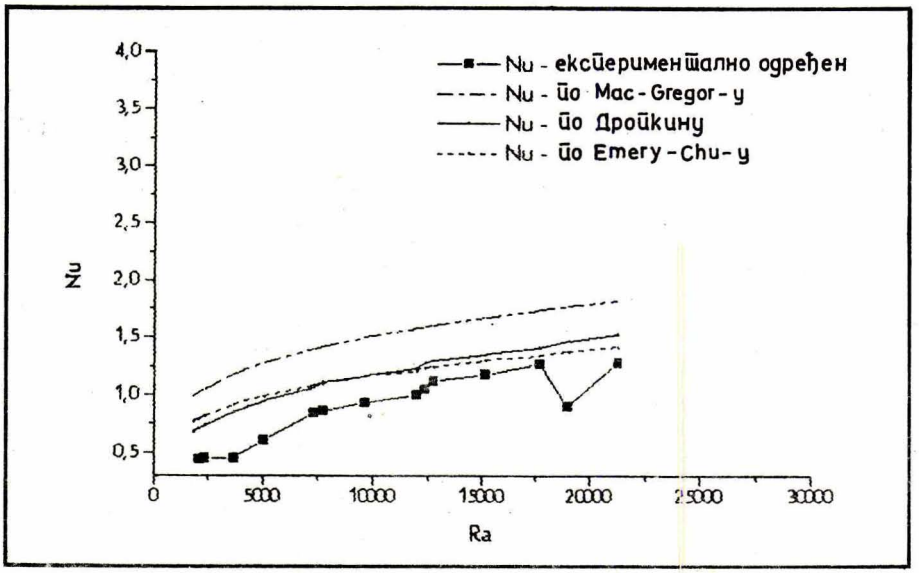
Интересантно је осврнути се и на старије резултате Emery-а и Chu-а [2, 9] који су експериментално одредили интензитет топлотног протока у хоризонталном правцу на ветикални затворен слој течности у ламинарном режиму $10^3 < Ra < 10^7$ за флуиде $3 < Pr < 30.000$, при чему су резултате формулисали у облику зависности без експлицитног утицаја Pr-броја.



Слика 4. Експериментални дијаграм зависности Nu од Ra



Слика 5. Упоређење експерименталних резултата са познатим моделима



Слика 6. Критично подручје зависности Nu од Ra

$$Nu = 0{,}280 \cdot (L/b)^{-1/4} \cdot Ra^{1/4} \qquad (6)$$

Emery и Chu [9] нису успели да утврде појаву турбулентног тока ни при највишим вредностима Ra-бројева достигнутих током испитивања, 10^7, мада су очекивали прелаз на турбулентни режим за вертикалан слој да се деси на око $Ra \approx 2 \cdot 10^5$ (данас генерално прихваћена вредност је $\approx 10^9$). Каснија испитивања су потврдила да се прелаз са ламинарног на турбулентни режим у слоју затворене течности дешава при много већим Ra-бројевима, него у случају слоја флуида неограничене дебљине уз равну плочу.

5. Анализа експерименталних резултата

Резултати мерења су обрађени и дати у облику ефективних коефицијената прелаза топлоте и критеријалних зависности $Nu = \alpha \cdot \delta/\lambda$, где су: α (W/m^2K) коефицијент прелаза топлоте, λ (W/mK) коефицијент провођења топлоте за посматрани флуид, а δ (m) дебљина слоја воде.

Познајући промену температуре дуж дебљине вишеслојног модела и узимајући у обзир губитке услед зрачења помоћу (1), одређене вредности коефицијената прелаза топлоте су употребљене за даље одређивање експерименталних вредности Nu-бројева у зависности од Ra-бројева (дијаграм на сл. 4), а потом упоређене са вредностима Nu-бројева одређених применом модела (3)–(6) су дате у дијаграмима на сл. 5 и 6. Вредности коефицијената прелаза топлоте и Nu-бројева су најближе вредностима коефицијената прелаза топлоте и Nu-бројева Emery–Chu-а (дијаграм на сл. 3). Од посебног значаја је подручје прелазних режима наступа природне конвекције, карактерисано вредностима Nu-бројева у близини и око вредности Nu = 1. Ово подручје је приказано увеличано на сл. 6. На истом дијаграму зависности Nu-бројева од Ra-бројева могу се одредити и приближне вредности критичног Ra_c-броја за све дате моделе, као и наша екпериментално одређена вредност критичног Ra_c-броја која се налази између 9 000 и 11 000 и као таква је најближа вредности од 7 000 Дробкина. За ближу анализу феномена и утицаја меродавних параметара, на спрегу појава преноса пре доношења неких још важнијих закључака треба наставити са испитивањима, посебно у близини критичних режима наступа као и обрнуто, престанка природне конвекције и проширити испитивања и на другу критичну област прелаз ламинарног струјања у турбулентно.

Литература

[1] **Dropkin, D. i E. Somerscales:** *Heat Transfer by Convection in Liquids Confined by Two Parallel Plates Which Are Inclined at Various Angles With Respect to the Horizontal,* Journal of heat Transfer, February, 1965. pp. 77–84.

[2] **Bohn, M. S. i R. Anderson:** *Influence of Prandtl Number on Natural Convection Heat Transfer Correlations,* SERI/TR-252-2967, Golden, 1994.

[3] **Holman, J. P.:** *Heat Transfer,* McGraw-Hill Company, New York, 1963. pp. 220–222.

[4] **Lage, J. L. A. Bejan i J. G. Georgiadis:** *The Prandtl Number Effect Near the Onset of Benard Convection in a Porous Medium*, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No.4, December 1992. pp. 408–411.

[5] **Hollands, K. G. T. i J. L. Wright:** *Heat Loss Coefficients and Effective Products for Flat-Plate Collectors With Diathermanous Covers*, Solar Energy, Volume 30, Number 3, 1983. pp. 211–216.

[6] **Тодоровић, М.:** *Обрађивање меродавних параметара материјала при сублимационом сушењу*, докторска теза, Машински факултет, Београд, 1976.

[7] **Тодоровић, М., М. Павловић, Ф. Коси, С. Миљанић, К. Спајић** i **В. Прикић:** *Radiation Transmissivity and Thermal Stresses of Transparent Materials,* Међународни симпозијум о техничким, организационим и економским аспектима коришћења сунчеве енергије, Београд, 1978.

[8] **Kenna, J. P.:** *The Multiple Layer Solar Collector*, Solar Energy, Volume 30, Number 3, 1983. pp. 225–235.

[9] **Emery, A. F. i N. C. Chu:** *Heat Transfer across Vertical Layers,* J. Heat Transfer, Vol. 87. 1965. pp. 110–116.

[10] **McGregor, R. K. i A. F. Emery:** *Free Convection through Vertical Plane Layers – Moderate and High Prandtl Number Fluids,* J. Heat Transfer, Vol. 91, 1969. pp. 391–403.