

**ПРИЛОГ ИСТРАЖИВАЊУ УТИЦАЈА ПРОЈЕКТНИХ ОДЛУКА НА РАДНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСПАРИВАЧА****CONTRIBUTION TO THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PROJECT
DECISIONS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF EVAPORATORS**Душан Тојагић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – МАШИНСТВО**

Кратак садржај – У раду су приказане основне карактеристике и улога испаривача у расхладном постројењу. Анализиран је математички модел стварања леда на испаривачима, описане важне пројектне одлуке које је потребно на одговарајући начин донети како би рад испаривача био оптималан и одржив.

Кључне речи: *Експлоатациони аспекти, ризици у раду постројења, размењивачи топлоте, испаривачи.*

Abstract – *In this MSc work are shown basic characteristics of evaporators and their role in cooling plants. Also, a frost formation mathematical model is analysed and design decisions were described that are important to be made correctly so that evaporator has optimal and sustainable work.*

Keywords: *Exploitation aspects, plant operation risks, heat exchangers, evaporators.*

1. УВОД

Испаривач представља топлотни апарат, односно тип размењивача топлоте, који има сврху да радни флуид у течном стању преведе у гасовито стање. Углавном је смештен у простор који се хлади и којем се доводи течни расхладни флуид који директно у њему испарава, користећи топлоту окружења која се одводи из хлађеног простора.

Ефекат хлађења у расхладним постројењима се постиже управо у процесу испаравања расхладног флуида, које се одвија у испаривачу. У овом раду ће бити анализиран утицај пројектних одлука на рад испаривача код којих је секундарни флуид ваздух, односно ваздушних хладњака, који примену налазе у комерцијалном и индустријском сектору.

Приликом рада испаривача на температурама нижим од 0°C долази до стварања леда на његовој површини што смањује његову ефикасност. То је неизбежна појава. У индустријским расхладним постројењима чест је случај да стварање леда на површини за размену топлоте драстично смањује ефикасност уређаја и повећава ризик да дође до квара неког дела постројења.

Циљ рада јесте да истражи и прикаже одлуке које могу бити донете како би се минимизирао утицај

стварања леда на перформансе система и одрживост процеса хлађења.

2. ПРИМЕРИ УПОТРЕБЕ ИСПАРИВАЧА

Испаривачи за комерцијалну и индустријску употребу налазе своју примену у најразличитијим областима. Користе се у климатизацији већих простора у којима су присутни људи, попут пословних простора, сала за састанке и серверских соба, као и за хлађење фармацеутских лабораторија, производних простора, расхлађивање машина и процеса у индустрији.

Они се као елемент расхладног постројења често производе у фабрикама које су специјализоване искључиво за производњу размењивача топлоте, што значи да се често испаривач поручује као готов производ који се једноставно монтира и прикључи на цевовод постројења.

Такође, употребу проналазе у производњи и складиштењу осетљивих намирница и производа као што су месо, млечни производи, воће и поврће, цвеће и слично.



Слика 1 - Примена испаривача

**3. ПОДЕЛА И КАРАКТЕРИСТИКЕ
ИСПАРИВАЧА**

Различити типови испаривача користе се у различитим применама и према томе имају и карактеристичне конструкције. У односу на размену топлоте, разликујемо испариваче са природном конвекцијом и са принудном конвекцијом.

До природне конвекције долази због тога што топлота спонтано прелази са тела више на тело ниже температуре. Код испаривача са принудном конвекцијом се уграђује пумпа или вентилатор који имају улогу да поспеше циркулацију флуида који се хлади, и усмере га да струји преко површине за размену топлоте.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Ђорђе Додер, доцент.

У овом делу биће извршена подела испаривача са принудном конвекцијом на основу конструкционих особина. Према конструкцији, испаривачи се могу поделити на испариваче са цевним снопом, са оребреним цевним снопом, и плочасте испариваче.

- Испариваче са цевним снопом одликује одсуство оребрења цеви, што их чини лакшим за одржавање, односно за чишћење и отапање. Цевни сноп овог типа испаривача не чини ништа друго него дугачка савијена цев, која је углавном од бакра или нерђајућег челика.

- Испаривачи са оребреним цевним снопом се користе за хлађење и одвлаживање ваздуха, и састоје се од оребрених савијених цеви које чине цевни сноп. Оребравање цеви се врши да би се повећала површина за размену топлоте, и користе се различити распореди оребрења.

- Код једног типа плочастих испаривача пролаз којим струји радни флуид ствара се између две металне плоче, на којима је утиснут рељеф такав да када се оне заваре једна за другу, формирају исти. Код другог типа плочастих испаривача, савијена цев поставља се између две металне плоче тако да плоче притисну цев. Ивице плоча се заварују једна за другу. Простор између плоча је или испуњен еутектичком смешом или је у њему вакуум.

4. ДОДАТНЕ РАЗЛИКЕ ИЗМЕЂУ ИСПАРИВАЧА СА ОРЕБРЕНИМ ЦЕВНИМ СНОПОМ

Комерцијални и индустријски испаривачи са оребреним цевним снопом се разликују по капацитету и области примене. Постоје модели који имају мали капацитет (10-15 kW) који се користе у мањим и средњим просторима, док постоје и уређаји већег капацитета који се користе за дубоко замрзавање или хлађење великих простора.

Основни типови које разликујемо јесу:

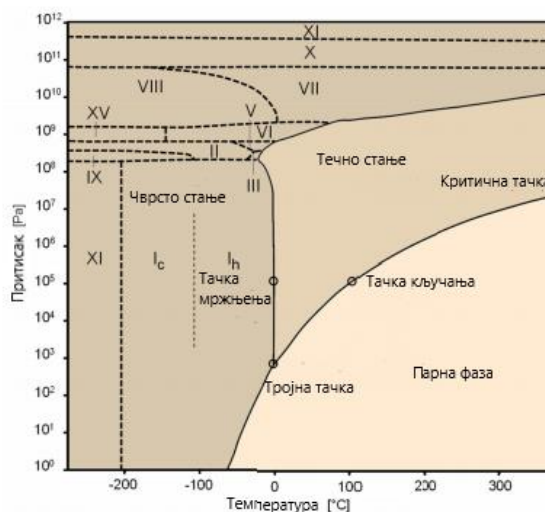
- компактни испаривачи
- кубични испаривачи
- испаривачи са двоструким током
- подни испаривачи

5. ПОЈАВА СТВАРАЊА ЛЕДА НА ПОВРШИНИ ИСПАРИВАЧА

Лед представља чврсто агрегатно стање воде. Као што је приказано на слици 2, на којој је приказан фазни дијаграм воде, у зависности од термодинамичких услова (притиска и температуре), може се уочити петнаест различитих облика леда.

Са друге стране, лед је порозан медијум који се састоји од кристала леда и влажног ваздуха који настаје услед веома специфичног скупа површинских и психрометријских услова. Када влажан ваздух опструји расхлађену површину, долази или до кондензације или до смрзавања. Уколико је температура површине испод температуре тачке росе и изнад температуре тачке смрзавања воде, долази до кондензације воде садржане у ваздуху. Уколико је, ипак, температура површине испод температуре тачке росе и испод температуре тачке смрзавања воде, долази до кондензације и смрзавања воде садржане у

ваздуху. Ипак, уколико су и температура површине и температура тачке росе испод температуре тачке смрзавања, долази директно до десублимације.



Слика 2 - Фазни дијаграм воде

Кристали леда расту у различитим облицима (морфологијама) у зависности највише од температуре и засићености влажног ваздуха.

Процес стварања леда подразумева истовремени пренос топлоте и масе током променљивих термофизичких услова. Сам процес је веома комплексан, те је стога, битно донети одређене претпоставке како би се поједноставила анализа.

- температура свих тачака за размену топлоте је испод 0 °C
- слој леда је равномерно распоређен по целој површини испаривача
- струјање је квази-стационарно
- топлотна проводљивост леда мења се само у зависности од густине леда
- размена топлоте зрачењем између ваздуха и леда је занемарива
- пренос топлоте и масе има једнодимензиони карактер

Пренос осетне и латентне топлоте одвија се симултано у контакту ваздуха и леда:

$$Q = h_a \cdot A_T \cdot (T_{ai} - T_{sur}) + h_m \cdot A_T \cdot i_{sv} \cdot (X_{ai} - X_{sur})$$

gde su: h_a – коефицијент прелаза топлоте са стране ваздуха [W/m^2K]

A_T – укупна површина за размену топлоте [m^2]

T_{ai} – температура ваздуха на улазу у испаривач [$^{\circ}C$]

T_{sur} – температура на површини леда [$^{\circ}C$]

h_m – коефицијент прелаза масе [kg/m^2s]

X_{ai} – апсолутна влажност на улазу у испаривач [kg/kg]

X_{sur} – апсолутна влажност на површини леда [kg/kg]

Израз за одређивање температуре на површини леда до ког се долази је:

$$T_s = T_p + \left[\frac{2 \cdot Q - \dot{m}_p \cdot i_{sv}}{2 \cdot k_f \cdot A_T} \right] \cdot \delta_f$$

T_p – температура на површини испаривача [$^{\circ}C$]

\dot{m}_p – количина водене паре која повећава густину слоја леда [kg/s]

i_{sv} – латентна топлота сублимације [J/kg]

k_f – топлотна проводљивост леда [W/mK]

δ_f – дебелина слоја леда [m]

Маса леда накупљеног на површини испаривача повезана је са апсолутном разликом влажности на улазу и излазу ваздуха у испаривач:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a \cdot (X_{ai} - X_{ae})$$

\dot{m}_a – масени проток ваздуха [kg/s]

X_{ae} – апсолутна влажност на излазу из испаривача [kg/kg]

Део водене паре из влажног ваздуха повећава густину леда док остатак паре повећава дебелину самог слоја, па се тако израз за одређивање масе леда може записати као:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_\rho + \dot{m}_p$$

Пад притиска ваздуха при струјању истог кроз сноп цеви испаривача може се одредити изразом:

$$\Delta P_a = \frac{G_{max}^2}{2 \cdot \rho_i} \cdot \left[(1 + \sigma^2) \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} - 1 \right) + f_a \cdot \frac{A_T}{A_{min}} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_m} \right]$$

G_{max} – максимални масени флуks [$kg/m^2 s$]

ρ_i – густина ваздуха на улазу у испаривач [kg/m^3]

σ – минимална површина

ρ_e – густина ваздуха на излазу из испаривача [kg/m^3]

f_a – фактор утицаја вентилатора

A_{min} – минимална површина за проток ваздуха [m^2]

ρ_m – густина ваздуха на просечној температури на излазу и улазу [kg/m^3]

6. ПРОЈЕКТНЕ ОДЛУКЕ

Прихватљив, односно задовољавајући пројекат мора да задовољи тражене захтеве за систем и не сме да излази из оквира области примене, материјала који се користе, безбедности као и утицаја на животну средину. У стадијуму пројектовања, фокус није на оптимизацији система, већ на добијању изводљивог и одрживог пројекта.

Иако било која конструкција која испуњава дате захтеве и оквире може бити адекватна за неке примене, генерално је пожељно тражити прихватљив домен по питању цене, лакоће израде, доступности материјала, погодности за наведену област примене, ефикасности у раду и слично.

Главни кораци при доношењу пројектних одлука, односно пројектовања система су:

- одређивање проблема
- формирање концепта
- иницијално идејно решење
- моделовање система
- симулација система
- процена система
- одабир одговарајуће изведбе.

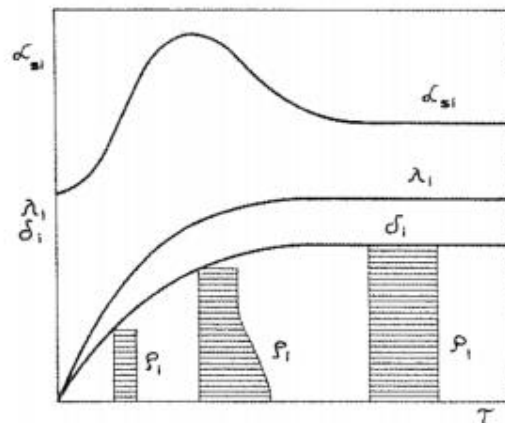
Уобичајене методе које се користе при иницијалном пројекту јесу:

- одабир компоненти које испуњавају тражене услове
- употреба постојећих система
- употреба постојеће инжењерске праксе и стручних сазнања.

Процес стварања иња јесте нестационаран и он у својим раним фазама образује равномерну порозну структуру иња по површини. Порозна структура је

храпава, што доводи до повећања прелаза топлоте 1,5 до 2 пута. Како се процес наставља, расте и дебелина и густина иња што додатно повећава коефицијент прелаза топлоте.

Међутим, у једном моменту новонастало иње попуњава поре и површина иња полако губи на храпавости што доводи до смањења коефицијента прелаза топлоте. На слици 3 може се видети како се у току времена, због повећања дебелине слоја иња, у почетку повећава коефицијент прелаза топлоте, да би после достизања своје максималне вредности почео да опада.



Слика 3. Дијаграм промене коефицијента прелаза топлоте

Иако се размена топлоте боље одвија на почетку када постоји присуство иња, при дужем раду капацитет испаривача значајно опада јер дебелина иња расте што доводи до ефекта да иње представља додатни отпор, то јест изолатор, при размени топлоте.

Одлуке које је важно донети на прави начин односе се на прилагођавање геометрије цеви и оребрења, на одабир типа оребрења и на избор материјала од ког се израђује цевни сноп испаривача, а све то у односу на услове у којима се очекује да испаривач ради (географска локација расхладног постројења, карактеристике климе и микроклиме у том подручју, радни параметри испаривача, расхладни флуид, потребна поузданост постројења...).

6.1. Прилагођавање геометрије цеви и оребрења

Густина оребрења, која се често мери у броју ребара по инчу (*Fins per inch – FPI*), критичан је параметар за пројектовање испаривача. Пренос топлоте се побољшава смањењем размака између ламела и повећањем броја редова цеви.

Последица неповољне геометрије цеви и оребрења јесте управо убрзано стварање леда на цевима и оребрењима, што доводи до повећања пада притиска који се остварује при струјању ваздуха кроз цевни сноп испаривача. Показало се да сама конструкција и нагиб оребрења немају значајан утицај на стварање леда у цевном снопу, већ да на то утиче распоред цеви као и размак између ламела. Уколико се они на правилан начин пројектују, побољшавају се топлотне перформансе апарата и продужава се његово време рада. Када се говори о распореду цеви у снопу, разликујемо два распореда, троугаони и квадратни.

Троугаони распоред представља компактнији начин слагања цеви у сноп, степен турбуленције течности је већи и коефицијент прелаза топлоте је већи, јер се у снопу исте величине добија више цеви у односу на квадратни.

Квадратни распоред цеви је погоднији за спољашње чишћење, али да би се оствариле исте перформансе, димензије снопа цеви морају бити веће у односу на троугаони распоред.

6.2. Одабир типа оребрења

Ребра чине већину површине за размену топлоте испаривача и имају највећи утицај на његов укупни капацитет, пад притиска са ваздушне стране и време рада. Ближе распоређена ребра доприносе већем капацитету, али код њих канали за струјање ваздуха лакше бивају блокирани ледом.

Врста оребрења може значајно да утиче на пренос топлоте и пад притиска кроз сноп цеви испаривача, и на перформансе испаривача у великој мери утиче врста изведене конструкције оребрења.

За примену у условима где се ствара велика количина леда, може се користити променљив размак између ребара, чиме се у првих неколико редова оставља већи размак између ребара чиме се пружа простор за нагомилавање леда, јер се управо у првих неколико редова ствара највећа количина леда.

6.3. Избор материјала цевног снопа

Брзина стварања и густина леда на цевном снопу увелико зависе од карактеристика површине. Научници *Okoroafor* и *Newborough* открили су да количина леда који се ствара на хладним површинама изложеним струјању топлог влажног ваздуха може бити значајно смањена присуством умрежених хидрофилних полимерних превлака. Хидрофилне превлаке у односу на хидрофобне су у предности када се говори о распореду кристала леда и времену за које се ствара лед, међутим, мане примене хидрофилних превлака јесу потребна дебелина превлаке, отпор при размени топлоте као и то што се превлака оштећује при топлотном ширењу. Коришћење новоразвијених фарби против стварања леда на металним површинама може да одгоди појаву истог за најмање 15 минута. Дебелина и маса слоја леда смањује се за отприлике 40% у поређењу са оном на незаштићеној површини метала.

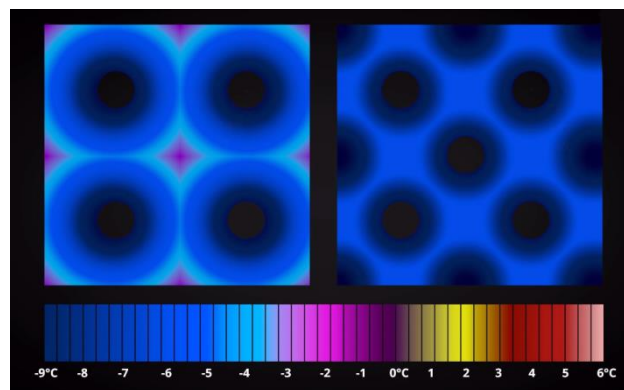
7. МЕРЕ ОТАПАЊА

Иако доношење одговарајућих пројектних одлука приликом пројектовања испаривача може одложити појаву или даље стварање леда, мере које пројектне одлуке прописују некада могу бити технички неизводљиве, или скупе за примену.

Чак и при адекватно донетим одлукама, стварање леда је неизбежно. Једна од подела отапања испаривача може бити према врсти топлотног извора који се користи, па тако имамо екстерне и интерне изворе топлоте. Екстерни извори могу бити електрична енергија (електроотпорно отапање грејачима) и вода. Интерним извором се сматра топли гас (са потиса компресора).

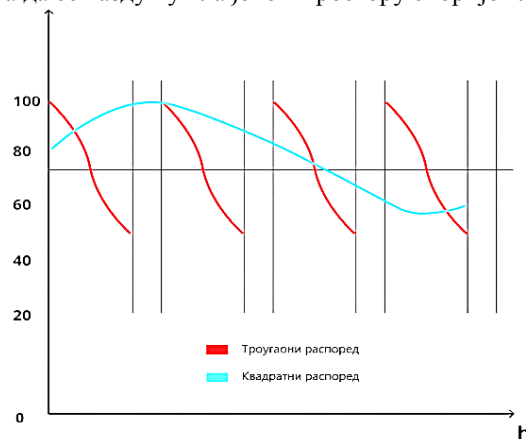
8. СИМУЛАЦИЈА УПОТРЕБЕ КВАДРАТНОГ И ТРОУГАОНОГ РАСПОРЕДА ЦЕВИ

Као што је наведено раније, предност троугаоног у односу на квадратни распоред цеви јесте то што сноп цеви са троугаоним распоредом компактнији, односно заузима мање простора за исти капацитет испаривача, степен турбуленције течности је већи, размењује се већа количина топлоте јер се у снопу налази више цеви. Са друге стране, троугаони распоред узрокује већи пад притиска при струјању ваздуха кроз испаривач.



Слика 4 - Приказ температурских поља

Када се говори о количини размењене топлоте, у општем случају, троугаони распоред одликује боља размена топлоте. Визуелно је то приказано на слици 4, где се види да се између цеви квадратног распореда формирају поља са вишом температуром, што имплицира да се ваздух у хлађеном простору спорије хлади.



Слика 5. Приказ разлике пада ефикасности за два распореда цеви

9. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Како испаривачи проналазе примену у свим деловима света, као елементарни део расхладних постројења, јасно је да, без обзира на географско подручје, треба да омогуће ефикасан и одржив рад постројења. Уколико се упореде средње вредности апсолутне влажности ваздуха и температуре у јулу месецу за подручје Златибора и Београда, користећи израз за одређивање издвојене количине леда може се израчунати разлика у количини леда формираног на испаривачу за ова два локалитета.

За исти период године, односно јул месец, количина леда која се издвоји на испаривачу који се користи у Београду је:

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \dot{m}_a \cdot (X_{ai} - X_{ae}) = 0,018 \cdot (0,016 - 0,00055) \\ &= 0,0002781 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

односно, то значи да се за 8 часова издвоји 8,01 килограма леда, док је на Златибору:

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \dot{m}_a \cdot (X_{ai} - X_{ae}) = 0,018 \cdot (0,009 - 0,00055) \\ &= 0,0001521 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

тј. за 8 часова се издвоји 4,38 килограма леда. Дакле, скоро дупло већа количина леда се формира на површини испаривача који се користи у Београду у односу на испаривач који се користи на Златибору. На основу кратког прорачуна, као и слика 5, закључује се да ће испаривач коришћен у средини са вишом релативном, односно апсолутном влажношћу, уколико се користи троугаони распоред цеви, доста чешће имати застоје у раду ради отапања формираног леда са површине испаривача, као и да ће пад притиска са ваздушне стране бити већи.

Одатле следи да је при пројектовању испаривача за подручје у близини река или мора, односно за подручја са вишом влажношћу ваздуха, оптимално решење квадратног распореда цеви. Коришћењем испаривача са квадратним распоредом цеви, да би се постигао исти капацитет, потребно је повећати габарите цевног снопа. Коришћењу овог типа испаривача се не приступа једино када простор ограничава димензије испаривача.

Међутим, коришћење овог типа геометрије цеви представља оптимално решење и оно је повољније зато што испаривач дуже остаје у радном режиму и спорије му опада ефикасност.

10. ЗАКЉУЧАК

Сазнања прикупљена у овом раду имају неколико практичних импликација за помоћ при пројектовању савремених испаривача, вентилатора, система за отапање и стратегија за управљање.

Иако је у овој области постигнут значајан напредак, простора за даље студије има и очекује се да исте допринесу развијању начина за ублажавање негативних ефеката развијања леда на површинама испаривача. Из перспективе индустријске примене, вероватно би највише пажње требало посветити процесима отапања и оптимизацији геометрије испаривача.

11. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fricke B., Elatar A. и Nawaz K. (2018.), A Critical Literature Review of Defrost Technologies for Heat Pumps and Refrigeration systems. Oak Ridge State Lab
- [2] Hermes Ch., Boeng J., Da Silva D., Knabben F. и Sommers A. (2021.). Evaporator Frosting in Refrigerating Appliances: Fundamentals and Applications. MDPI, Швајцарска
- [3] O'Neal D.L. (1982.). The Effect of Frost Formation on the Performance of a Parallel Plate Heat Exchanger. Универзитет Вест Лафајет, САД.
- [4] Seker D., Karatas H., Egrican N. (2003.). Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part I – Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Универзитет Једитепе, Истанбул, Турска.

Кратка биографија:



Душан Тојагић рођен у Новом Саду 1997. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Расхладна техника – „Технике управљања у расхладној техници“ одбранио је 2020. године.

контакт: tojagic.dus@gmail.com