



RAZMENE TOPLOTE IZMEĐU GASA I CILINDRA U KLIPNOM KOMPRESORU

HEAT EXCHANGE BETWEEN THE GAS AND CYLINDER IN RECIPROCATING COMPRESSOR

Milojević S.^{*}, Filipović N.^{**}, Pešić R.^{***}

REZIME

Razmena toplote između gasa i metalnih delova klipnog kompresora (zid i glava cilindra i klip), značajno utiče na performanse klipnog kompresora, temperaturu ventila i dr. To je dovelo do povećanja broja teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, i to uglavnom u oblasti hermetičkih kompresora za rashladne uređaje. Zbog toga, raspoloživi modeli razmene toplote nisu primenljivi za male, vazduhom hladene, kompresore za vazduh koji se koriste u okviru kočnog i pomoćnih sistema komercijalnih vozila, traktora i dr.

U radu je prikazano istraživanje razmene toplote na malom, brzohodnom klipnom kompresoru. Implementiran je obećavajući model razmene toplote u cilindru pri nestacionarnim uslovima. Međutim, pre generalne primene modela, potrebno je implementirati podatke eksperimentalnog merenja. Autori se nadaju da će navedene podatke dobiti merenjem na probnom stolu za male vazdušne kompresore u Laboratoriji za motore Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. To se najviše odnosi na merenje toplotnog fluksa, zbog čega je posebno analizirana mogućnost primene komercijalnog senzora.

Ključne reči: klipni kompresor, razmena toplote, senzor toplotnog fluksa, modeliranje

SUMMARY

Heat transfer between the gas and metal parts of a reciprocating compressor (cylinder wall and cover, and piston) has significant effect upon the reciprocating compressor performance, the temperature of the valves, etc. This has given rise to a number of theoretical and experimental studies, mainly in the field of hermetic refrigeration compressors. Therefore, the currently available heat transfer models are not useful for small, air-cooled, air compressors used on commercial vehicles, tractors, etc. inside of their braking and other auxiliary systems.

This paper presents an investigation about heat transfer in small, fast running reciprocating compressor. One promising simple unsteady model was implemented for predicting the cylinder heat transfer. However, more measurement data are required before a fully qualified

^{*} mr Saša Milojević, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, tiv@kg.ac.rs

^{**} prof. dr Nenad Filipović, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, fica@kg.ac.rs

^{***} prof. dr Radivoje Pešić, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, pesicr@kg.ac.rs

statement as to its general utility can be made. The authors hope to obtain these on the test rig for small air compressors in the Engine Laboratory of the Faculty of Engineering of Kragujevac University. That is mainly concerning to the heat flux measurement, because, the application one commercial sensor is specifically analyzed.

Keywords: Reciprocating compressor, heat exchange, heat flux sensor, modelling

UVOD

U toku radnog procesa u cilindru klipnog kompresora razmena energije se jednim delom ostvaruje vršenjem rada. To se realizuje naizmeničnim kretanjem klipa od spoljašnje (SMT) ka unutrašnjoj mrtvoj tački cilindra (UMT). Rad koji vrši klip u toku procesa kompresije pri kretanju ka SMT dovodi smanjenja zapremine nadklipnog prostora i do povećanja i pritiska i temperature radne materije (vazduha). Suprotno kompresiji, u toku procesa ekspanzije, kada je kretanje klipa prema UMT potpomognuto pritiskom vazduha koji je zadržan u štetnoj zapremini cilindra, vrednosti pritiska i temperature vazduha se respektivno smanjuju, analogno povećanju zapremine nadklipnog prostora. Zbog toga se u velikoj meri razlikuju vrednosti vremenski konstantnih veličina relevantnih termičkih procesa u gasu i metalnim delovima cilindarskog prostora (kontrolna površina). Postoji i vremenska i prostorna razlika u vrednosti njihove temperature, što doprinosi povećanju razmene energije u vidu prenosa toplote. Dodatno, svež vazduh ustrujava u cilindar u toku procesa usisavanja i intenzivno se meša sa zagrejanim gasom u cilindru, što doprinosi intenzivnijem prenosu toplote. Strujanje u cilindru kompresora je naročito intenzivno i turbulentno pri usisu. U literaturi [3] se može naći snimljena zavisnost intenziteta turbulencije od ugla kolenastog vratila. Dobijene vrednosti se kreću u granicama od minimalno 1 na početku usisavanja, kada je klip u položaju SMT, a zatim usled dinamike usisnog ventila funkcija dobija talasast oblik, posle čega dostiže maksimalnu vrednost 14 u toku usisavanja. U toku izduvavanja turbulencija je najintenzivnija na početku ovog procesa i dostiže vrednost oko 9. Zbog navedenih činjenica, opravdano se očekuje da navedeni procesi imaju bitan uticaj na performanse kompresora. Razmena energije u vidu prenosa toplote i rada koji izvrši klip je intenzivnija u manjim, brzohodnim kompresorima sa višim pritiscima u izduvnom vodu. Tada, pri kompresiji vazduha sa pritiska okoline dolazi do pregrevanja metalnih delova cilindra. Ova činjenica je potvrđena ispitivanjem kompresora za vazduh koji je sličan eksperimentalnom, i čija je radna zapremina 380 cm^3 [5]. Pri ispitivanju kompresora, na režimu 3600 min^{-1} , snimljena je vrednost maksimalne temperature kompresije iznad $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Kod kompresora koji nemaju eksterni sistem za hlađenje, maksimalna temperatura je znatno viša i predstavlja problem. Zbog toga, kompresor radi sa pregrejanim vazduhom tako da može doći do lokalnog pregrevanja njegovih delova, što dovodi do postepenih i trajnih oštećenja kompresora i opreme, posebno zaptivača i sl. Sa druge strane, pregrejan vazduh može izazvati prevremena oštećenja sistema na vozilu u okviru koga se koristi kompresor, a to su sistem za kočenje, sistem za elastično oslanjanje i dr.

U raspoloživoj literaturi o klipnim kompresorima, koja je sistematizovano prikazana u literaturi [6] naglašeno je da razmena energije između gasa i zidova cilindra ima značajan efekat na performanse i može uticati na smanjenje stepena korisnosti kompresora za oko 10 do 20%. Sa druge strane, javlja se i dvoumljenje vezano za uticaj procesa prenosa toplote na performanse kompresora. Tako se na osnovu rezultata istraživanja pojedinih autora, došlo i do drugačijih podataka, pa se navodi da stepen korisnosti kompresora može biti niži za svega 2.5% (najviše 4%), usled odvijanja procesa prenosa toplote. U oba slučaja, rezultati istraživanja su dobijeni ispitivanjem na kompresoru za rashladne uređaje.

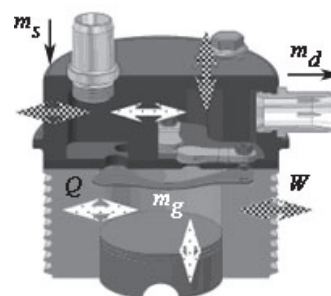
Eksperimentalna analiza procesa razmene energije između gasa i metalnih delova cilindra klipnog kompresora zahteva ne samo vreme, već i primenu savremene opreme, tako da su potrebna i veća finansijska sredstva. Takođe, u velikom broju slučajeva je nemoguće realizovati eksperimentalnu instalaciju i dobiti pouzdane rezultate merenja. Zbog navedenih razloga je i razumljivo, zašto se prednost daje matematičkom modeliranju relevantnih procesa u kompresoru. Rezultatima prethodnog modeliranja se olakšava posao konstruktorima, čiji je zadatak da projektuju mašinu optimalnih karakteristika, sa pouzdanim radom i produženim servisnim intervalima. Međutim, da bi se postavili ulazni parametri modela, potrebno je iste odrediti eksperimentalnim putem. Zbog toga su autori istraživali mogućnost eksperimentalnog merenja toplotnog fluksa u cilindru prototipa klipnog kompresora za vazduh koji se koristi u kočnoj instalaciji autobusa i kamiona, o čemu u raspoloživoj literaturi ne postoje adekvatni rezultati. Za tu svrhu je ispitana mogućnost primena komercijalnog senzora toplotnog fluksa, i predložen je način njegove ugradnje u glavi eksperimentalnog kompresora.

MODELIRANJE TERMODINAMIČKIH PROCESA U CILINDRU

Za potrebe modeliranja termodinamičkih procesa u cilindru, klipni kompresor se posmatra kao nulto-dimenzionalni, otvoreni termodinamički sistem promenljive radne zapremine. Promena radne zapremine se ostvaruje slično kao kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem naizmeničnim kretanjem klipa od (SMT) ka (UMT), što se realizuje posredstvom klipnog mehanizma. Razmena radne materije sa okolinom (maseni protok vazduha) se ostvaruje preko usisnih i izduvnih ventila, i malim delom kroz zapore između klipa i cilindra (produvanje u korito kompresora). Prenos toplote se odvija preko svih površina koje su u kontaktu sa gasom u cilindru, a to su glava i zidovi cilindra, klip i dr., slika 1. Temperature ovih površina se razlikuju, što se uzima u obzir pri modeliranju.

Na slici 1, strelicama su označeni mogući pravci odvijanja procesa prenosa toplote koji su uobičajeni kod kompresora za vazduh [5]. Pri modeliranju se na primer, uzima u obzir grejanje usisnog vazduha usled prenosa toplote sa zagrejanog izduvnog na usisni vod, usled čega dolazi do pogoršanja projektovanih performansi kompresora i oštećenja delova.

U tabeli 1 su sistematizovani mogući pravci razmene i prenosa toplote u klipnom kompresoru za vazduh. Dalja i složenija analiza zahteva izvesna pojednostavljenja radnog procesa u kompresoru, i to sa ciljem formiranja što preciznijeg modela procesa.



Sl. 1 Pravci prenosa toplote
 Fig. 1 Heat transfer paths

Tab. 1. *Mogući pravci razmene energije i prenosa toplote u klipnom kompresoru [5]*

Tab. 1. *Possible energy exchange and heat transfer paths inside of reciprocating compressor [5]*

RAZMENA ENERGIJE	PRENOS TOPLOTE
Gas → zidovi cilindra	Gas → zidovi cilindra → okolina
Gas → ploča ventila	Gas → ploča ventila → usisni/ izduvni vod
Gas → klip	Gas → klip → korito kompresora
Gas → zidovi izduvnog voda	Gas → zidovi izduvnog voda → sistem za hlađenje
Gas u izduvnom vodu → glava cilindra	Gas u izduvnom vodu → glava cilindra → usisni vod
	Gas u izduvnom vodu → glava cilindra → okolina

U toku jednog radnog ciklusa u cilindru klipnog kompresora se odvijaju četiri procesa:

1. Usisavanje: Vazduh turbulentno ustružava preko usisnog ventila u cilindar gde vladaju nestacionarni radni uslovi. Usisni vazduh se zagreva usled mešanja sa vazduhom u cilindru, i usled dodira sa zidovima cilindra. Toplota se tada prenosi na vazduh u cilindru i toplotni fluks je pozitivan. Maseni protok vazduha zavisi od razlike pritisaka usisavanja i pritiska u cilindru.
2. Kompresija: Ventili su zatvoreni, pa se takvim smatra i cilindar. Klip se kreće prema SMT, vršeći rad kompresijom vazduha. Prenos toplote se tada odvija u oba smera posmatrano u odnosu na cilindar, zavisno od razlike temperatura.
3. Izduvavanje: Turbulentna struja komprimovanog vazduha kroz izduvni ventil izlazi u izduvni vod. Toplotni fluks je negativan i usmeren je od radne materije prema zidovima i glavi cilindra.
4. Ekspanzija: Zaostali vazduh u štetnoj zapremini cilindra vrši rad potiskivanjem klipa prema UMT. Razmena toplote se odvija u oba smera posmatrano u odnosu na cilindar, zavisno od razlike temperatura.

Zakon o održanju mase vazduha u cilindru može da se izrazi u diferencijalnom obliku, jednačina 1:

$$\frac{dm_g}{dt} = \sum_{ports} \dot{m} \quad (1)$$

gde se indeks m_g odnosi na količinu gasa u cilindru a $ports$ se odnosi na delove površine cilindra kroz koje gas ulazi ili izlazi u cilindar, odnosno usisni i izduvni ventil i mesta isticanja na primer.

Zakon o očuvanju energije u kontrolnoj zapremini, odnosno energetska ravnoteža gasa u cilindru, može da se prikaže u vidu I. zakona termodinamike u diferencijalnom obliku, jednačina (2).

$$\frac{dU_g}{dt} + \sum_{ports} \dot{m} \cdot h_t = \frac{\partial Q}{dt} - \frac{\partial W_p}{dt} \quad (2)$$

gde je sa U_g označena unutrašnja energija gasa, h_t ukupna entalpija, Q toplotni fluks i W_p rad koji izvrši klip. Količina gasa koji ustružava u cilindar u jedinici vremena, kao i toplota koja se predaje gasu imaju pozitivan predznak, dok se rad klipa, koji se vrši na račun unutrašnje energije vazduha, uvodi kao negativan.

Da bi se odredila unutrašnja energija, neophodno je integraliti jednačinu (2), što zahteva, da sve veličine na desnoj strani jednačine budu prikazane u funkciji od vremena (u obliku izvoda). Prethodnu činjenicu navodimo jer je uobičajeno da se procesi u cilindru prate u funkciji zapremine nadklipnog prostora, odnosno, ugla kolenastog vratila. Tako je i rad klipa povezan sa geometrijom kompresora i kinematikom klipnog mehanizma i izražava se u obliku izvoda po uglu kolenastog vratila. Ako zanemarimo gubitke usled isticanja kroz zatore, protok vazduha se određuje zavisno od karakteristika ventila i njihove interakcije sa cilindrom i delovima usisnog i izduvnog voda, čije se zapremine smatraju beskonačno velikim, tako da se u njima može zanemariti promena kinetičke i potencijalne energije gasa [4,6].

Iako je proces prenosa toplote bio aktivan predmet istraživanja poslednjih decenija, ipak ne

postoji jasan i sadržajan uvid u stanje u ovoj oblasti, posebno kada se radi o kompresorima za vazduh [1,2,6].

Obzirom na karakteristike i princip rada klipnog kompresora, prenos toplote između vazduha i zidova cilindra se odvija putem prinudne konvekcije, pri nestacionarnim uslovima. Količina prenešene toplote se tada računa primenom klasične Njutn-ove formule (Newton) [5,6]:

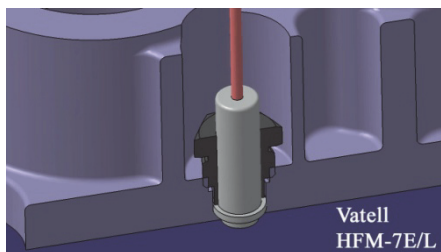
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \alpha \cdot A_w \cdot (T_w - T_g) \quad (3)$$

gde je α koeficijent lokalne konvekcije, A_w površina prenosa toplote, dok T_w i T_g predstavljaju temperature zidova i radne materije respektivno. Površinu A_w čine površina čela klipa, glave cilindra, kao i površina zidova cilindra koja zavisi od položaja čela klipa u odnosu na SMT. U literaturi [1,2,3,6] su prikazane neke od jednačina za proračun koeficijent prenosa toplote. To su jednačine koje su formulisali prvenstveno Nusselt, Eichelberg, Annand, Woschni, Adair i dr.

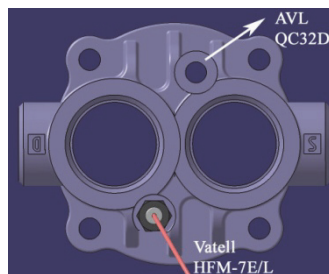
KARAKTERISTIKE SENZORA TOPLOTNOG FLUKSA

Za potrebe eksperimentalnog merenja, analizirana je mogućnost ugradnje komercijalnog senzora toplotnog fluksa (HF) marke i tipa Vatel HFM-7E/L, čiji je prečnik čeonu površine 6.32 mm [7]. Na slici 2.a je prikazan senzor toplotnog fluksa, sa predloženim načinom ugradnje u glavi cilindra, dok je na slici 2.b prikazan položaj ugradnje senzora u odnosu na usisni (S) i izduvni (D) ventil. HF senzor se ugrađuje bliže izduvnom ventilu uz pomoć navoja (M12x1.75) i koristi se za merenje temperature ($^{\circ}\text{C}$) i toplotnog fluksa ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) istovremeno, pri čemu je vreme odziva od 6 μs .

Maksimalna dozvoljena radna temperatura na čeonu površini senzora je 300°C . Senzor se sastoji od više termoparova (povezanih u jednu termočeliju - kućište), čiji je merni signal u vidu napona koji je proporcionalan toplotnom fluksu, dok je veza između ove dve veličine zasnovana na Žibek-ovom efektu (engl. Seebeck effect). Senzor temperature je električni otpornik od platine koji okružuje senzor toplotnog fluksa. Pri merenju je potrebno obezbediti prinudno hlađenje delova kompresora vazduhom. U glavi kompresora je montiran i senzor pritiska u cilindru marke i tipa AVL QC32D. Predloženi položaj ugradnje senzora u glavi kompresora je bliže usisnom ventilu, što je prikazano na slici 2.b.



(a) Senzor toplotnog fluksa; (a) Heat flux sensor



(b) Položaj senzora HF u glavi cilindra; (b) HF sensor position in cylinder head

Sl.2 Senzor predložen za merenje toplotnog fluksa
Fig. 2 Heat flux sensor proposed for the measurements

POREDENJE REZULTATA MODELIRANJA I EKSPERIMENTA

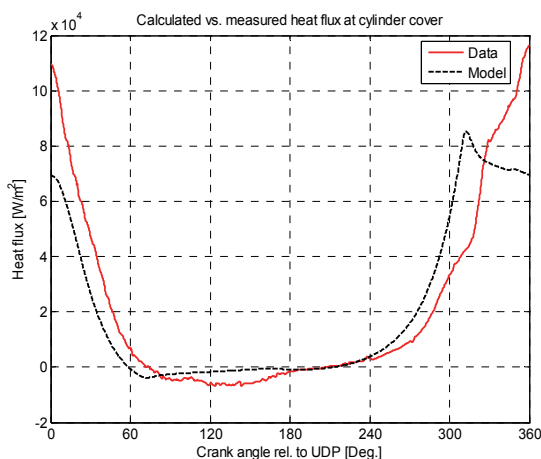
Do sada je toplotni fluks u cilindarskoj glavi kompresora razmatran kroz više teorijskih i eksperimentalnih studija, bilo na akademskom nivou ili za potrebe industrije. Međutim, sa izuzetkom gasnih opruga i Stirling motora, rezultati merenja toplotnog fluksa su retko objavljivani. Autori su iz tog razloga odlučili da prikažu rezultate merenja toplotnog fluksa u glavi cilindra kompresora, čije su karakteristike date u literaturi [6].

Prikazani rezultati merenja količine razmenjene toplote u glavi cilindra, slika 3, su takođe dobijeni primenom komercijalnog senzora toplotnog fluksa Vatel HFM-7E/L, koji je prikazan na slici 2.a. Obzirom da se radilo o većem kompresoru u glavi su simetrično montirana dva senzora na jednakoj udaljenosti od usisnog i izduvnog ventila. Senzorima je takođe merena i temperatura kućišta ventila.

Na slici 3 su prikazani i rezultati modeliranja toplotnog fluksa, kao i odgovarajući rezultati merenja koji su dobijeni merenjem pri odnosu pritiska (4:1), tj. za vrednost pritiska u izduvnom vodu od 0.4 MPa. Vrednosti su prikazane u zavisnosti od ugla kolenastog vratila kompresora [6].

Ako analiziramo znak konvekcije, prenos toplote ka sistemu je pozitivan, dok je prenos toplote od sistema negativan. Tačnije, misli se da je prenos toplote koji podiže energiju sistema pozitivan, odnosno negativan kada utiče na smanjenje energije sistema. Ukratko, u toku rada, u cilindru kompresora, toplotni fluks je veći od nule kada toplota prelazi sa gasa na zidove cilindra, i tada je ($T_g > T_w$). Sa druge strane toplotni fluks je manji od nule kada toplota prelazi sa zidova na gas u cilindru. U rezultatima proračuna, toplotni fluks postaje negativan od 60 °KV (stepeni ugla kolenastog vratila), odnosno od 80 °KV, kada su u pitanju eksperimentalni rezultati. U oba slučaja toplotni fluks ponovo postaje pozitivan od 200 °KV, i dostiže maksimalnu vrednost od $85 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ na krivi modela, i zatim naglo opada do $70 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. U slučaju eksperimentalnih rezultata, izmerena maksimalna vrednost toplotnog fluksa iznosi $140 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ [6].

Analizom rezultata modeliranja (model Lawton-a) i eksperimenta, može se zaključiti da ne postoje veća odstupanja. Takođe, može se uočiti da su snimljene vrednosti toplotnog fluksa u toku nisko-temperaturnog dela ciklusa približno jednake. U toku ekspanzije, vrednosti toplotnog fluksa dobijene modeliranjem su konstantno niže u odnosu na eksperimentalne rezultate, dok su u toku procesa izduvavanja ove vrednosti više. Oscilacije toplotnog fluksa se javljaju u toku procesa usisavanja i izduvavanja ali su malog intenziteta i zavise od dinamike ventila, koja je takođe uzeta u obzir u okviru modela uz određena pojednostavljenja/ nepoznati



Sl. 3 Poređenje modela Lawton-a sa rezultatima merenja toplotnog fluksa

Fig. 3 Comparison of the model of Lawton with measured heat flux data

ulazni parametri modela su procenjeni. Tako su i podaci o ventilima ovde procenjeni.

ZAKLJUČCI

Analizom raspoložive literature, može se doći do zaključka da nedostaju istraživanja u oblasti modeliranja procesa razmene toplote u klipnim kompresorima za vazduh koji se koriste u okviru kočnog sistema teretnih vozila, autobusa i traktora.

Vezano za karakteristike i princip rada klipnog kompresora, razmena toplote između vazduha i zidova cilindra se odvija pri nestacionarnim uslovima, što može da se analizira kao prinudna konvekcija. Količina razmenjene toplote u okviru modela se tada računa primenom klasične Newton-ove formule.

Na osnovu poređenja sa rezultatima eksperimenta, može se zaključiti, da se primenom jednostavnog nestacionarnog modela Lawton-a može predvideti razmena toplote u cilindru kompresora sa prihvatljivom tačnošću. Međutim, da bi se potpuno obuhvatio radni proces, nedostaju ulazni podaci u model koji su procenjeni i koji se mogu dobiti jedino merenjem. Autori se nadaju, da će ove rezultate dobiti ispitivanjem jednocilindričnog eksperimentalnog kompresora za vazduh koji je postavljen u Laboratoriji za motore SUS na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektu Tr 35041 koji je finansiran od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1.] Brok, S. W., Touber, S. and Van der Meer, J. S. (1980). Modeling of Cylinder Heat Transfer – Large Effort, Little Effect? Purdue International Compressor Engineering Conference. Paper 305.
- [2.] Chang, J., Guralp, O., Filipi, Z., Assanis, D., Kuo, T. W., Najt, P. and Rask, R. (2004). SAE Paper 2004-01-2996.
- [3.] Keribar, R. and Morel, T. (1988). Heat Transfer and Component Temperature Prediction in Reciprocating Compressors. Purdue International Compressor Engineering Conf. Paper 658.
- [4.] Milojević S., Pešić R., Taranović D. (2012). IZVOĐENJE VENTILA KLIPNIH KOMPRESORA I USLOVI PRI MODELIRANJU, Journal Tractors and Power Machines, Novi Sad, ISSN 0354-9496(2012) 17: 2/3, p. 71-77, UDK 621.629.
- [5.] Mullner T. and Biemeiler O. (2008). Heat Transfer in Small Piston Compressors. Purdue International Compressor Engineering Conference. Paper 1908.
- [6.] Ninković, D., Taranović, D., Milojević, S. and Pešić, R. (2012). A review of models for predicting instantaneous heat exchange between the gas and cylinder in reciprocating compressors. International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, October 3rd-5th, 2012, Proceedings MVM2012-023, pp. 126-136, ISBN 978-86-86663-91-7.
- [7.] Heat Flux Specialists, <http://www.vatell.com>, accessed on July 10th 2013.

Rad primljen: 22.09.2013.

Rad prihvaćen: 05.10.2013.