

**Александар М. Ерић<sup>1\*</sup>, Драгољуб В. Дакић<sup>2</sup>, Сиван Ђ. Немода<sup>1</sup>,  
Мирко С. Комајина<sup>2</sup>, Дејан М. Буровић<sup>1</sup>, Андријана Д. Сиојановић<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Лабораторија за термотехнику и енергетику,  
Институт за нуклеарне науке „Винча“, Универзитет у Београду, Београд, Србија  
<sup>2</sup> Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

## **Експериментално одређивање пермеабилности балираног сојиног остатка**

Оригинални научни рад  
UDC: 662.637:532.546

*Биомаса као најзначајнији обновљиви извор енергије код нас, има значајне предности са аспекта очувања животне средине, јер се њеним коришћењем не повећава концентрација угљендиоксида у атмосфери, што се у истој мери уклапа у тенденције земаља чланица Крпине споразума, међу којима је и Република Србија.*

*У складу с тим, зруја сарадника Лабораторије за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча“, низ година уназад значајно ради на промовисању коришћења отпадне пољопривредне биомасе, што је финализовано развојем којла снаге 1,5 MW за сагоревање балираног сојиног остатка за потребе грејања 1 хектара пластеника у оквиру Пољопривредног комбината Београд.*

*За потребе дефинисања термодинамичких карактеристика горива (балираног сојиног остатка) које су од посебног значаја за свеобухватније сагледавање и предвиђање процеса сагоревања, у овом раду је приказано експериментално одређивање коефицијента пермеабилности. Коефицијенти су одређивани тако да одговарају вискозним и инерционим члановима уопштене Форхајмерове једначине. Експерименталним испитивањима је обухваћен утицај порозности на пермеабилност, а као резултат анализе експерименталних података, дефинисане су и функционалне зависности поменутих коефицијента од порозности. Поред тога, у раду је разматран и утицај влажности биомасе на пермеабилност, као и функционална зависност влажности и порозности.*

*Одређивање параметара пермеабилности, као и њихове зависности од утицајних фактора (порозности и влажности), полазе су основе у даљем испитивању кинетике процеса сагоревања у реалним условима, што је веома значајно при дефинисању геометријских карактеристика ложишта.*

Кључне речи: сојин остатак, сагоревање, пермеабилност,  
Форхајмерова једначина

---

\* Одговорни аутор; електронска адреса: erica@vinca.rs

## Увод

Према званичним подацима Агенције за енергетску ефикасност Републике Србије (СЕЕА), Србија располаже са 3,2 Мтое у обновљивим изворима енергије, који се користе у занемарљивој количини. Што се тиче потенцијала обновљивих извора енергије 2,6 Мтое чини биомаса, 0,15 Мтое мале хидроелектране, 0,18 Мтое геотермална енергија и 0,1 Мтое сунчева енергија. Из ове анализе се види да је биомаса основни потенцијал Републике Србије у обновљивим изворима енергије. Од процењене количине биомасе 60% се односи на биомасу пољопривредног порекла, док се 40% односи на шумску биомасу. Ова енергетска слика била је оријентир развоја и делатности Лабораторије за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча”, тако да је, након више година истраживања и развоја, у оквиру Пољопривредног комбината Београд инсталисан индустријско-демонстрациони котлао снаге 1,5 MW за сагоревање отпадне балиране сојине сламе, у циљу грејања једног хектара пластеника. Сагоревање у котлу се обавља по принципу „цигаретног сагоревања” [1–3], при чему се као гориво користе бале димензија 0,7 × 1,2 × 2,0 m. Да би се извршила оптимизација рада овог демонстрационог котла потребно је, поред низа експерименталних испитивања, направити и нумерички модел процеса сагоревања по предложеној технологији. Технологија подразумева сагоревање у порозној средини, па је претходно потребно извршити термофизичку карактеризацију те средине, која подразумева одређивање струјних и термичких карактеристика порозног слоја.

Утицај струјних карактеристика се највише огледа у изворном члану елиптичке једначине одржања количине кретања и то преко пада притиска услед струјања флуида у порозној средини. Овај пад притиска је последица трења услед струјања вискозног флуида, какви су димни гасови и ваздух, кроз поре порозног слоја. Пад притиска у порозној структури први је дефинисао Дарси (Darcy) [4, 5] према коме је брзина струјања флуида кроз порозни слој пропорционална градијенту притиска  $p$ :

$$p = \frac{\mu}{K} \vec{w} \quad (1)$$

где је  $\mu$  коефицијент динамичке вискозности,  $K$  коефицијент пермеабилности, а  $w$  „суперфицијална” брзина или брзина трења, која се рачуна као средња брзина по попречном пресеку порозног слоја и једнака је производу брзине струјања флуида у пори и порозности. Овај облик Дарсијеве једначине може да се користи при малим брзинама струјања флуида када је вискозни ефекат доминантан [6]. Међутим, при већим брзинама, према [4], долази до формирања потенцијалног језгра које се повећава како брзина расте, услед чега настаје неравнотежа у једн. (1). Поменути ефекат се у литератури назива инерциони ефекат и физички је представљен додатним чланом у Дарсијевој једначини и пропорционалан је квадрату брзине. Квадратни члан је у једн. (1) први увео Форхајмер (Forchheimer), услед чега се једн. (2) назива Форхајмерова једначина [7, 8]. Ако се претпостави једнодимензионални случај и узме апсолутна вредност пада притиска, Форхајмерова једначина добија погодан облик:

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu}{K} w \beta \rho w^2 \quad (2)$$

Коефицијент  $\beta$  у квадратном члану може да се одреди полуемпиријским једначинама за неке једноставније структуре порозног слоја. Тако, на пример, за порозни слој сачињен од сфера постоји Џозефова (Jozef) једначина за  $\beta$  [8] у облику  $\beta = C_F/K^{1/2}$  или Ергунова (Ergun) једначина за укупан пад притиска која се може видети у литератури [5], али такође за слој куглица. За порозан слој каква је балирана сојина слама једини пут за одређивање коефицијената  $K$  и  $\beta$  је експериментални поступак. У овом раду је приказан експериментални поступак за одређивање ових коефицијената, као и резултати који су том приликом добијени.

### Експериментална метода

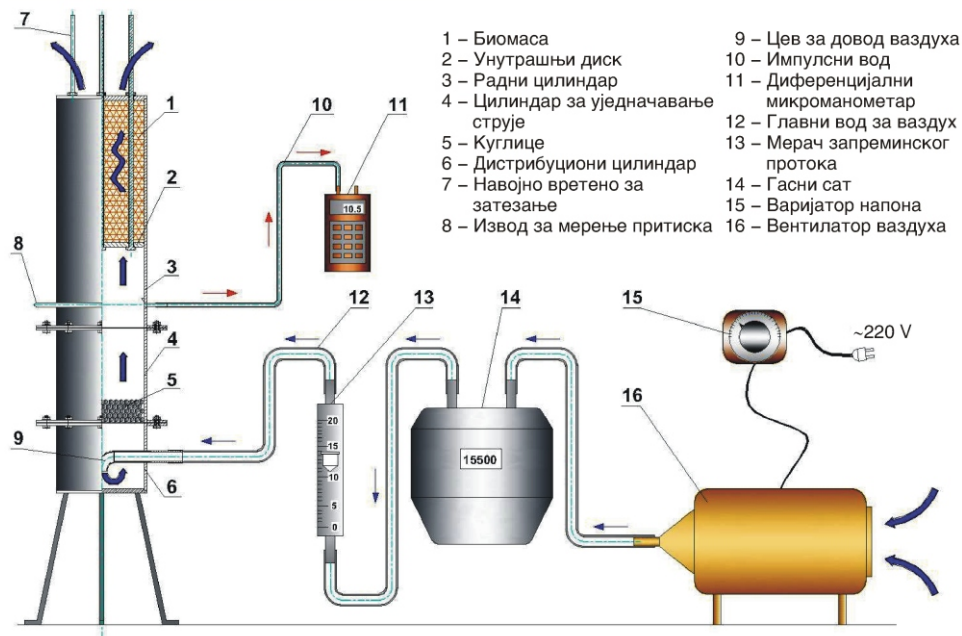
Експериментална метода, коју је развио и применио Дарси још у 19. веку за потребе изградње водовода у Дижону, је веома једноставна и примењивана је до данас. Ова метода се састоји у мерењу две величине и то пада притиска приликом струјања неког флуида кроз порозни слој ( $p$ ) и његовог протока ( $\dot{V}$ ). Експериментално одређивање коефицијената  $K$  и  $\beta$  се своди на експериментално дефинисање параболе, једн. (2), која представља зависност градијента притиска у порозном слоју од брзине. Вредности коефицијената ове параболе, односно Форхајмерове једначине, су одређивани за ваздух на температури околине.

Шема инсталације на којој су обављена експериментална истраживања приказана је на сл. 1. Инсталација се генерално састоји из три целине: радног дела, система за допрему и мерење протока ваздуха и линије за мерење пада притиска. Радни део експерименталне инсталације је цилиндричног облика и у њему је смештена биомаса (1), односно сојина слама. Одређена количина (маса) сојине сламе се у радном цилиндру (3) помоћу унутрашњег диска (2) и вијака (7) своди на потребну запремину тако да се постигне жељена порозност. Унутрашњи диск је покретан и његова позиција у односу на горњу плочу може да се мења завртањем вијака са навртком.

Ваздух се помоћу цеви за довод ваздуха (9) уводи у дистрибуциони цилиндар (6), након чега пролази кроз цилиндар за уједначавање струје (4). Ваздух уједначене брзине по попречном пресеку, улази у радни цилиндар на коме се налази извод за мерење статичког притиска  $p_z$  струје ваздуха пре уласка у слој (8). Ваздух даље пролази кроз перфорирани унутрашњи диск, слој биомасе одређене висине  $\Delta l$  и перфорирану горњу плочу у околину, у којој влада атмосферски притисак  $p_a$ .

Систем за допремање и мерење протока ваздуха се састоји од вентилатора за ваздух (16), варијатора напона (15), којим се подешава жељени проток, гасног сата (14), којим се мери количина протеклог гаса, ротаметра (13), који служи за контролу протока и система црева (12) са системом за заптивање. Линија за мерење пада притиска кроз слој сојине сламе се састоји од импулсног вода који је повезан са изводима за мерење статичког притиска (10) и дигиталног микро-манометра.

Након изведених експеримената на датој апаратури при чему су мерене количине протеклог ваздуха и пад притиска кроз слој у седам различитих тачака,



Слика 1. Шема експерименталне инсталације за одређивање пермеабилности

дељењем протекле количине ваздуха кроз инсталацију  $\dot{V}$   $Q_2$   $Q_1$  са временским интервалом  $\Delta t$ , добија се запремински проток ваздуха, а дељењем ове величине са попречним пресеком слоја  $d^2\pi/4$ , добија се брзина  $w$ . Градијент притиска  $\Delta p/\Delta x$  кроз слој  $z$  се добија дељењем средње вредности пада притиска очитане на микроманометру и висине слоја. Цртањем зависности градијента притиска од суперфицијалне брзине добијене су вредности одговарајућих коефицијената  $K$  и  $\beta$ , уз познавање параметара струје за услове извођења експеримената  $T_0 = 20$  С.

Коефицијенти Форхајмерове једначине одређивани су за различите вредности порозности од 0,62 0,78, као и при различитим садржајима влаге бале чија порозност са влагом од 9,48% износи 0,68. Резултати ових експеримената приказани су у следећем поглављу.

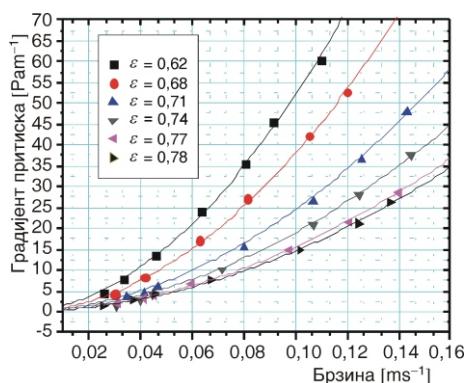
### Експериментални резултати и њихова анализа

На основу предложеног поступка резултати експеримената приказани су у табл. 1.

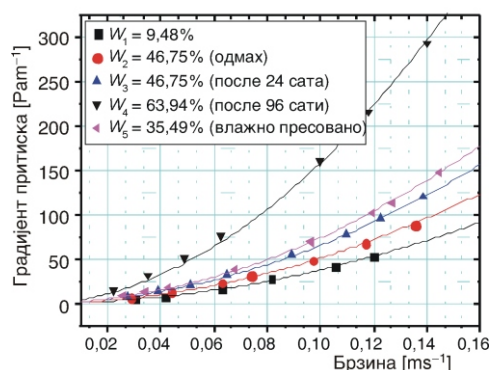
Цртањем линија које одговарају израчунатим вредностима брзине и градијента притиска, сл. 2, добијене су параболе чији коефицијенти одговарају коефицијентима Форхајмерове једначине. На основу ових коефицијената лако се могу изра-

**Таблица 1. Запремински проток и пад притиска кроз слој при промени порозности**

Порозност											
0,78		0,77		0,74		0,71		0,68		0,62	
Запр. проток	Пад притиска	Запр. проток	Пад притиска	Запр. проток	Пад притиска	Запр. проток	Пад притиска	Запр. проток	Пад притиска	Запр. проток	Пад притиска
16,272	10,7	16,632	10,8	17,184	12,7	17,004	14,5	15,648	14,4	16,092	20,8
14,772	8,7	14,364	8,2	14,808	9,4	14,94	11,1	13,128	10,8	13,068	14,1
12,072	6,1	11,616	5,6	12,696	7,0	12,684	8,0	10,476	7,5	10,812	10,6
8,028	3,1	7,092	2,5	8,52	3,4	9,552	4,7	8,688	5,7	9,6	8,3
5,412	1,7	5,412	1,5	5,34	1,4	5,532	1,5	5,388	2,8	7,56	5,6
4,392	1,2	4,944	1,2	4,74	0,9	4,956	1,1	3,72	1,4	5,412	3,2
3,024	0,6	3,672	0,7	3,684	0,4	4,152	0,5	2,544	0,8	3,96	1,8



**Слика 2. Експерименталне параболе**



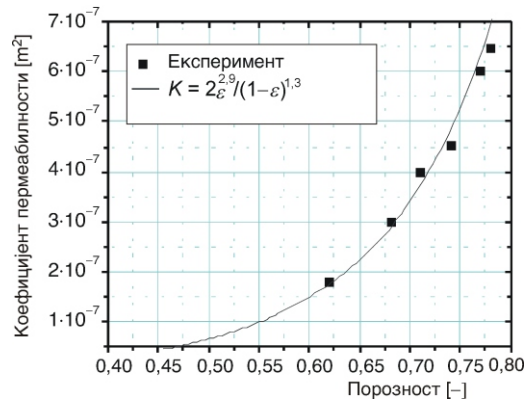
**Слика 3. Утицај влаге на градијент притиска**

чунати коефицијенти  $K$  и  $\beta$  за познате вредности густине и вискозности струје гаса ( $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$  и  $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$ ). Вредности ових коефицијената приказане су у табл. 2.

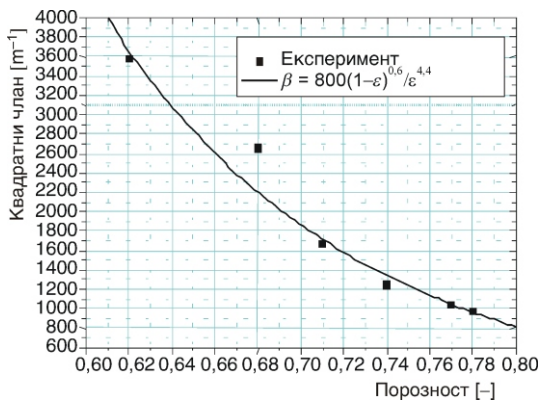
Из експерименталних резултата може се видети да, генерално, коефицијент пермеабилности расте са порастом порозности, а инерциони члан опада (табл. 2), што је и очекивано. Пермеабилност у суштини представља пропустљивост слоја и логично је да расте са порастом порозности (сл. 4), јер се тада повећава и слободна површина кроз коју струји једнака количина флуида. Код инерционог члана у коме фигурише инерциони коефицијент случај је обрнут (сл. 5). Овај члан у Форхајмеровој једначини је последица инерционог ефекта услед пораста брзине струјања кроз поре. При већој брзини у пори долази до формирања хидродинамичког граничног слоја што представља одређену врсту отпора струјању. Што је брзина у пори већа то овај ефекат има

**Таблица 2. Коefицијенти друге фазе експерименталних истраживања**

Порозност	Коefицијент параболe		Коefицијент пермеабилности, $K$ 10 [m <sup>2</sup> ]	Инерциони члан $\beta$ [m <sup>-1</sup> ]
	Линеарни	Квадратни		
0,62	100	4200	1,81	3485,48
0,68	60	3200	3,01	2655,60
0,71	45	2000	4,02	1659,75
0,74	40	1500	4,52	1244,81
0,77	28	1180	6,03	1037,34
0,78	30	1250	6,46	979,25



**Слика 4. Зависност  $K$  од порозности**



**Слика 5. Зависност  $\beta$  од порозности**

снажнији утуцај. Опадањем брзине у пори, при истој брзини трења, што је последица пораста порозности, долази до слабљења овог ефекта, па је и логично да вредност инерционог коefицијента буде нижа. На основу табл. 2 веома је једноставно наћи експерименталну зависност коefицијената  $K$  и  $\beta$ , што је приказано на сл. 4. и 5.

Као крајњи резултат експерименталних истраживања ове фазе могуће је дефинисати Форхајмерову једначину, јединствену за случај балиране сојине сламе, у којој ће уместо коefицијената  $K$  и  $\beta$  фигурисати порозност:

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu}{\frac{2\varepsilon^{2,9}}{(1-\varepsilon)^{1/3}} 10^{-7}} w \quad (3)$$

$$800 \frac{(1-\varepsilon)^{0,6}}{\varepsilon^{4,4}} \rho w^2$$

Експериментална истраживања извршена су и при коришћењу балиране сојине сламе референтне порозности 0,68, али различите влажно-сти. Ови експерименти су имали за

циљ да симулирају реалне услове који се могу десити при експлоатацији постројења, када услед атмосферских утицаја дође до пораста влаге у бали, што све за последицу има поремећај дефинисане кинетике сагоревања.

Ради одређивања утицаја влажности бале на коефицијенте  $K$  и  $\beta$ , укупно је извршено четири експеримента. У прва три експеримента радни део апаратуре, сл. 1, (3) стављен је у посуду са водом док не упије одређену количину влаге, а затим је одмах (први експеримент) или након одређеног времена (други и трећи експеримент) подвргаван описаној експерименталној процедури. Ова три експеримента имала су за циљ симулирање случаја када у већ балираној сојиној слами дође до пораста влажности. Четврти експеримент је изведен тако што је већ влажна слама стављана у апаратуру и пресована са истим притиском као и слама референтне влажности, како би се симулирали реални утицаји на коефицијенте Форхајмерове једначине, када се пресује слама повећане влажности.

Резултати ових истраживања приказани су у табл. 3 и на сл. 3. Анализом резултата приказаних у табл. 3 може се закључити да са порастом влажности у узорку долази до пада пропустљивости слоја, односно пада коефицијента  $K$ , а пораста коефицијента  $\beta$ . Овај резултат је очекиван, јер услед дифузије влаге у чврсту матрицу порозног слоја долази до пораста адхезионих сила и повећања запремине пора унутар сламке соје, односно затворених пора кроз које нема струјања флуида. Ово повећање запремина затворених пора се одвија на рачун смањења запремина отворених пора кроз које струји флуид, јер је укупна запремина бале практично непроменљива.

**Таблица 3. Утицај влажности на коефицијенте  $K$  и  $\beta$**

$W$ [%]	Напомена	Изворна порозност [	Коефицијенти параболе		$K \cdot 10^7$ [m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [m <sup>-1</sup> ]	Одговарајућа порозност
			Линеарни	Квадратни			
9,48	Изворни узорак	0,68	60	3200	3,01	2655,60	0,680
46,75	Мерено одмах	0,68	85	4300	2,13	3568,46	0,623
46,75	Мерено после 24 сата	0,68	130	5300	1,39	4398,34	0,591
63,94	Мерено после 96 сати	0,68	300	13000	0,6033	10788,38	0,499
35,49	Влажно пресовано		137	6100	1,32	5062,24	0,585

### Закључак

У овом раду је приказан поступак одређивања коефицијената Форхајмерове једначине при струјању флуида кроз порозан слој балиране сојине сламе. Из добијених резултата се види хиперболичка зависност ових коефицијената и порозности. Повећањем порозности повећава се и линеарни коефицијент док инерциони коефицијент опада и обрнуто. Пораст влаге значајно утиче на смањење порозности услед деловања адхезионих сила, што за последицу има утицај на коефицијенте Фор-

хајмерове једначине. Добијени коефицијенти могу се успешно користити приликом моделирања процеса сагоревања балиране сојине сламе, а предложен је и полуемпиријски израз пада притиска кроз балирани слој сојиног остатка у зависности од његове порозности.

### Литература

- [1] Mladenović, R., Erić, A., Mladenović, M., Repić, B., Dakić, D., Energy Production Facilities of Original Concept for Combustion of Soya Straw Bales, *Proceedings on DVD-ROM, 16<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets*, Valencia, Spain, 2008, ISBN 978-88-89407-58-1
- [2] Младеновић, Р., Ерић, А., Младеновић, М., Паприка, М., Репић, Б., Дакић, Д., Енергетско постројење снаге 2 MW са сагоревањем великих бала сојине сламе, *ПТЕП Часопис за процесну инжењерију и енергетскику у пољопривреди*, 10 (2006), 1-2, 38-41
- [3] Bech, N., Wolff, L., Germann, L., Mathematical Modeling of Straw Bale Combustion in Cigar Burners, *Energy & Fuels*, 10 (1996), 2, 276-283
- [4] Илић, Г., Радојковић, Н., Стојановић, И., Термодинамика II, Основе простирања топлоте, Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, 1996.
- [5] Nield, D. A., Bejan, A., Convection in Porous Media, 3<sup>rd</sup> ed., 2006
- [6] Wu, Y.-S., Numerical Simulation of Non-Darcy Flow in Porous and Fractured Media, Geothermal Resources Council, 2000 Annual Meeting, *GRC Transactions*, 2000, Vol. 24, 641-646
- [7] Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, 2<sup>nd</sup>, Springer, 1995
- [8] Spanos, T. J. T., The Thermophysics of Porous Media, Chapman & Hall/CRC, Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics 126, 2001

### Abstract

## Experimental Determination of the Balled Soya Residue Permeability

by

*Aleksandar M. ERIĆ<sup>1\*</sup>, Dragoljub V. DAKIĆ<sup>2</sup>, Stevan DJ. NEMODA<sup>1</sup>,  
Mirko S. KOMATINA<sup>2</sup>, Dejan M. DJUROVIĆ<sup>1</sup>, and Andrijana D. STOJANOVIĆ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Laboratory for Thermal Engineering and Energy,

Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Biomass as the most important renewable energy source in our country has also significant advantages from the aspect of environment protection. The later is because its use does not increase the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, what is completely in accordance with the tendencies of the signatory countries of the Kyoto Agreement, including the Republic of Serbia.

Accordingly, a group of associates of the Laboratory for Thermal Engineering and Energy of the Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, a large number of years



has invested huge efforts into promoting the use of agricultural waste biomass. These efforts finished with the development of 1.5 MW power boiler combustion balled soybean residue for 1 ha heating greenhouses in the Agricultural complex Belgrade.

For purposes of defining the thermophysical properties of fuel (balled soybean residue), which are of great importance for the comprehensive understanding and prediction of the combustion process, this work has been shown experimental determination of the permeability coefficients in Forchheimer's equation which presents the pressure drop through porous media. Coefficients were determined to match the viscous and inertia terms of the general Forchheimer's equation. Experimental research include influence of porosity on permeability analysis, and accordingly, the semi-empirical dependence of these coefficients of porosity has been given. In addition, the paper also has discussed the influence of humidity on the permeability of biomass, and the dependence on moisture and porosity, as well.

The determination of permeability parameters, and their dependence of the relevant factors (porosity and humidity), is the starting base for the further study of the combustion process kinetics under real conditions, what is very important for the defining combustion chamber construction features.

*Key words: soya residue, combustion, permeability, Forchheimer equation*

\* Corresponding author; e-mail: erica@vinca.rs

Рад примљен: 20. фебруара 2010.  
Рад прихваћен: 8. марта 2010.