

Изследване влиянието на геометричните характеристики върху хидродинамиката в биореактор с механично разбъркване с три бъркалки

Анна Лечева, Иванка Желева, Милен Неделчев

Studying the influence of geometric characteristics on hydrodynamics in a bioreactor with mechanical mixing, equipped with three mixers: This paper shows the results of a numerical simulation of the studying behaviour of the fluid in a bioreactor with mechanical agitation equipped with three mixers. A parametric analysis of the fluid motion in case of different geometrical characteristics of the mixers for several values of the dynamic parameter Reynolds number $Re = 10, 100, 500$ is made. The calculations have been done with a computer program, written in MATLAB and apporobated in [8]. The fluid structure is described and the numerical results are graphically presented.

Key words: Navier-Stokes equations, mechanical mixing, hydrodynamics, stream function, velocity field, Reynolds number

ВЪВЕДЕНИЕ

Необходимостта от изследването на хидродинамиката в биореактори с механично разбъркване е породена от все по-намаляващите енергийни ресурси в глобален аспект, както и от увеличаващите се екологични изисквания към промишлените производства. Тези основни световни тенденции поставят сериозни задачи и предизвикателства пред съвременните промишлени технологии. Основен проблем в редица съвременни промишлености, например в химичната, биотехнологичната, хранително-вкусовата, фармацевтичната и други, е свързан с необходимостта от намаляване на енергийните разходи за производството на единица продукт.

Известно е, че съществена част от енергията в тези технологии се изразходва за разбъркване и хомогенизиране на различни химични, хранителни и биоактивни смеси (сусペンзии). Освен това, от огромно значение е фактът, че индустрията в световен мащаб търпи съществени финансови загуби именно поради недоброто познание и управление на процесите, свързани с механичното разбъркване в технологичните производства. Това обуславя необходимостта от задълбочено изследване на разбъркването от математическа гледна точка, целящо оптимизирането и намаляването на потреблението на енергия при запазване на хидродинамичните характеристики на потоците и намаляването на финансовите средства, вложени за производството на крайния продукт.

Методът на компютърно моделиране се използва масово в последните години при проектирането, изучаването и управлението на различни технологични процеси и поради бурното развитие на компютърните и софтуерните технологии [3]. Тъй като компютърното моделиране и симулиране не изисква скъпото възпроизвъдство на сложни технологични процеси в лабораторни условия, то представлява мощен инструмент за изследване и анализ на различни видове обекти, явления и процеси.

В настоящата статия са показани резултати от проведени числени експерименти за изследване на поведението на флуид в биореактор с механично разбъркване, оборудван с три бъркалки. Направен е параметричен анализ на поведението на флуида при промяна на геометричните характеристики на бъркалките за няколко различни стойности на динамичния параметър число на Рейнолдс $Re = 10, 100, 500$.

ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

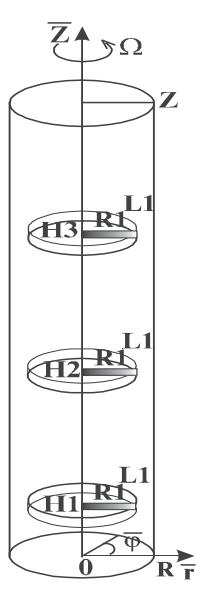
1. Геометрична област - схема на биореактор с три бъркалки

Предполага се, че биореакторът с три бъркалки е прав кръгов цилиндър с радиус R и височина Z . В него по оста са разположени три еднакви диска с радиус

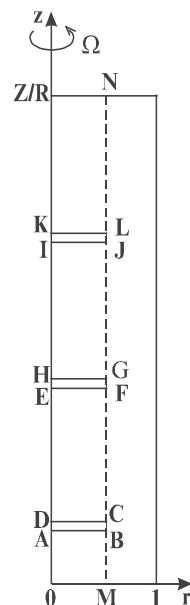
R_1 и дебелина L_1 съответно на височина H_1 , H_2 и H_3 от дъното на цилиндъра (Фиг.1). От съображения за удобство, е въведена цилиндрична координатна система $(\bar{r}, \bar{\phi}, \bar{z})$. Разбърквачите дискове се въртят с постоянно зададена ъглова скорост Ω .

Предполага се също, че течението е ососиметрично, следователно, компонентите на скоростта са функции само на \bar{r} и \bar{z} . Поради осовата симетрия, се разглежда само половината от осовото сечение на цилиндъра. Геометричната област, в която се изследва хидродинамиката е показана на Фиг.2. В нея пространствените променливи се изменят съответно в интервалите $0 \leq r \leq 1$ и $0 \leq z \leq Z/R$. Бъркалките представляват областите ABCD и EFGH и IJKL.

Движението на флуида в реактора е индуцирано от действието на въртенето на оста с бъркалките и е изследвано достатъчно дълго време след започване на разбъркването, т.е. течението е установено.



Фиг.1 Схема на биореактор с механично разбъркване с три бъркалки



Фиг. 2 Схема на изчислителната област в биореактор с механично разбъркване с три бъркалки

2. Основни уравнения и гранични условия

За съществуване на механично подобие между теченията в изследвания биореактор е необходимо да бъдат удовлетворени следните условия [7]: геометрично подобие, кинематично подобие и динамично подобие. Подобните течения се описват с еднакви системи диференциални уравнения, чито решения предполагат тъждественост на безразмерните гранични и начални условия.

Движението на флуида в биореактора се описва от уравненията на Нави-Стокс. Записани в безразмерна форма, в цилиндрична координатна система (r, ϕ, z) и след въвеждане на функция на тока ψ , вихър на скоростта ω и момент на тангенциалната скорост M , тези уравнения изглеждат по следния начин [1,2,3,8]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -\omega, \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + U \frac{\partial M}{\partial r} + W \frac{\partial M}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \frac{\partial \omega}{\partial r} + W \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial M^2}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial U}{\partial z} \right], \quad (3)$$

$$U = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (4)$$

където $\vec{V}(U, V, W)$ е векторът на скоростта с неговите компоненти във въведената цилиндрична координатна система в безразмерен вид. За характерен линеен размер е избран радиусът R на цилиндръа, а за характерна скорост е избрана постоянно зададената ъгловата скорост Ω , с която се върят разбъркващите дискове. Всички параметри се обезразмеряват чрез въведенния характерен линеен размер R и характерната линейна скорост ΩR по следния начин:

$$r = \frac{\bar{r}}{R}, \quad z = \frac{\bar{z}}{R}, \quad U = \frac{\bar{U}}{\Omega R}, \quad W = \frac{\bar{W}}{\Omega R} \text{ и } Re = \frac{\Omega R^2}{v} \text{ е числото на Рейнолдс.}$$

За коректната математическа формулировка на граничната задача е необходимо да се дефинират подходящи гранични условия за всички неизвестни функции [2,7,9]. Поставят се традиционните гранични условия за полепване на вискозния флуид върху твърдите стени на реактора. Върху неподвижните твърди стени се поставят нулеви гранични условия за компонентите на вектора на скоростта $\vec{V}(U, V, W) = 0$, а върху бъркалките скоростта на флуида съвпада със скоростта на въртене на бъркалките. На оста на симетрия се поставят условия за симетрия, които гарантират ограниченност на решението при $r = 0$ [9].

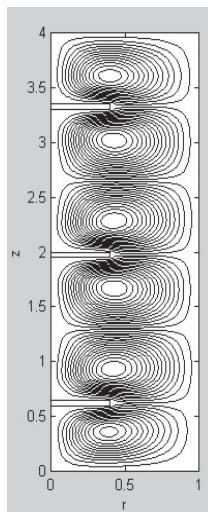
ЧИСЛЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Задачата е решена при следните стойности на параметрите: $Re = 10, 100, 500$; радиусът на бъркалките е 0,4 и 0,5; дебелината на бъркалките е 0,05 и 0,1; разстояние между първата бъркалка и дъното е 0,6 и 0,55; разстоянието между бъркалките е 1,3. На Фиг.1.a, б, в са показани линиите на тока при число на Рейнолдс равно съответно на 10, 100 и 500, при радиус на бъркалките равен на 0,4 и дебелина на бъркалките 0,05. На Фиг.2.a, б, в са показани линиите на тока при същите стойности на числото на Рейнолдс, но при радиус на бъркалките равен на 0,5 и при същата дебелина. И в двата случая най-долната бъркалка е разположена на височина 0,6 от дъното на реактора, а разстоянието между всеки две от бъркалките е 1,3.

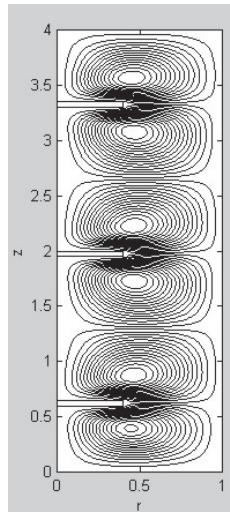
Таблица 1. Стойности на изчислителните геометрични параметри, изолинии на ψ

Re		10	100	500		
Височина на поставяне спрямо дъното	Радиус на бъркалките R1	Дебелина на бъркалките L1				
H1=0.6		0.05	0.1	0.05	0.1	0.05
H2=H1+1.3	0.4	Фиг.1.а	-	Фиг.1.б	-	Фиг.1.в
H3=H2+1.3	0.5	Фиг.2.а	-	Фиг.2.б	-	Фиг.2.в
H1=0.55	0.4	-	Фиг.3.а	-	Фиг.3.б	-
H2=H1+1.3	0.5	-	Фиг.4.а	-	Фиг.4.б	-
H3=H2+1.3						Фиг.4.в

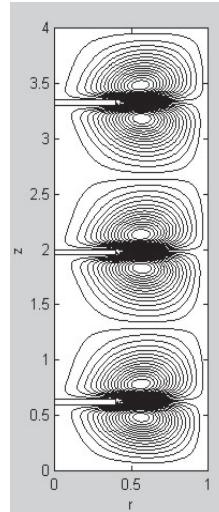
На Фиг.3.а, б, в са показани линиите на тока при стойности на числото на Рейнолдс равни на 10, 100, 500. Радиусът на бъркалките е 0.4, а дебелината им е 0.1. Най-долната бъркалка е разположена на височина 0.55 от дъното на реактора, а разстоянието между всеки две от бъркалките е 1.3. На Фиг. 4. а, б, в са показани линиите на тока при същите стойности на числото на Рейнолдс, но при радиус на бъркалките равен на 0.5 и при същата дебелина.



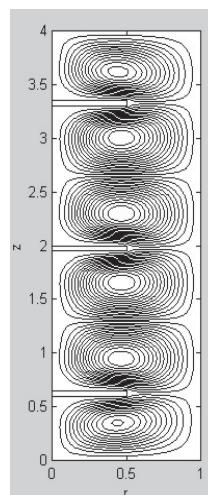
Фиг.3.а



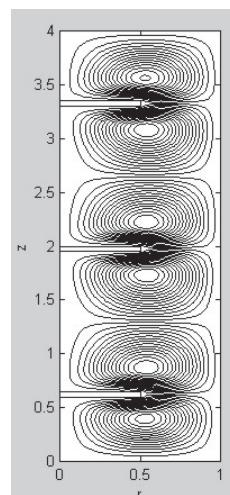
Фиг.3.б



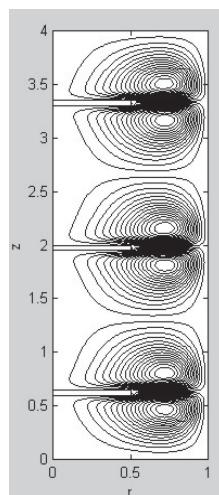
Фиг.3.в



Фиг.4.а



Фиг.4.б

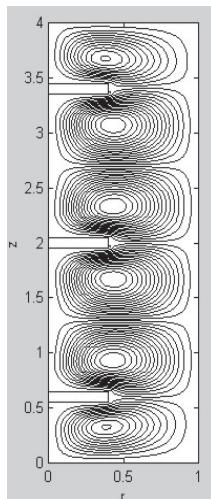


Фиг.4.в

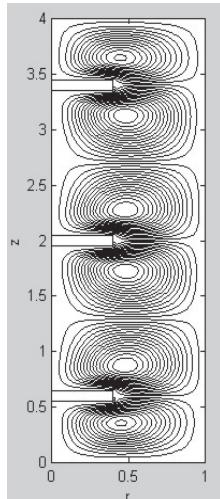
От Фиг.3 и Фиг.4. се вижда, че в течението са образувани шест вихрови структури: една между дъното и първата бъркалка, една над третата бъркалка и по

две между бъркалките.

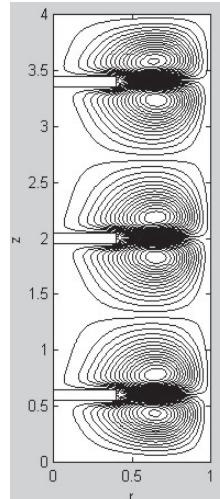
С нарастването на числото на Рейнолдс (Re), броят на вихрите не се променя, но се променя интензивността и местоположението на центровете им, което води до по-добро разбръкане на флуида в целия биореактор. При промяна радиуса и дебелината на бъркалките, характерът на вихровите структури се запазва, а местоположението на центровете им се изтегля напред и към нивото на бъркалките (за вихрите, разположени под бъркалките, центровете се изместяват нагоре, а за вихрите, разположени над бъркалките, центровете се изместяват надолу). Това води и до по-добро разбръкане около стените на реактора.



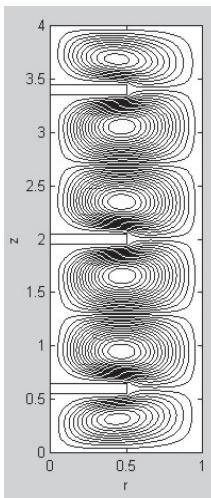
Фиг.5.а



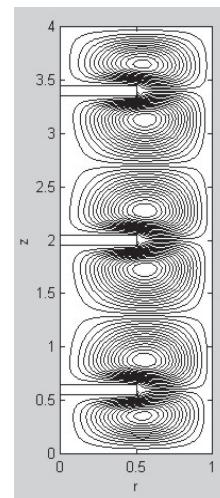
Фиг.5.б



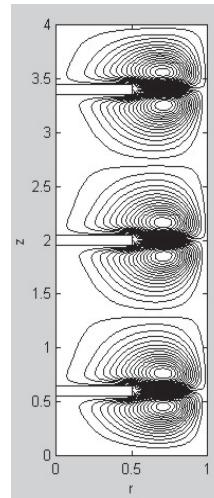
Фиг.5.в



Фиг.6.а



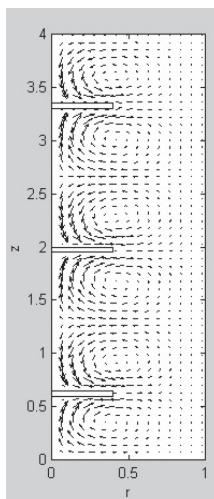
Фиг.6.б



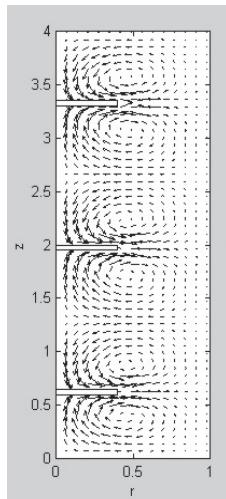
Фиг.6.в

На следващите фигури (Фиг. 5. а, б, в; Фиг. 6. а, б, в; Фиг. 7. а, б, в; Фиг. 8. а, б, в) е представено векторното поле на скоростта при гореописаните стойности на параметрите: число на Рейнолдс, радиус и дебелина на бъркалките, местоположение на най-долната бъркалка спрямо дъното на реактора, разстояние между бъркалките, които са дадени в Таблица 1.

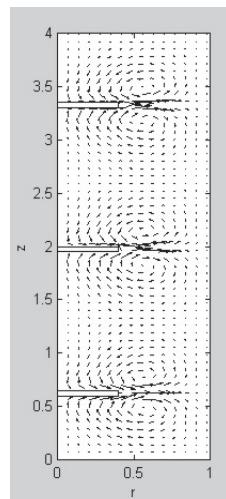
Същите зависимости, характеризиращи влиянието на геометричните параметри върху флуидния поток в биореактора, се забелязват и на следващите четири фигури (Фиг. 7, 8, 9 и 10), които представляват полето на скоростта.



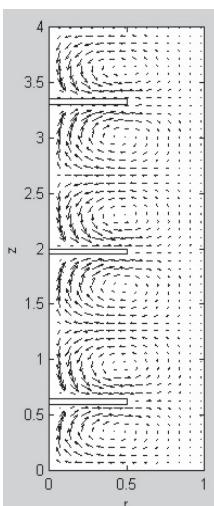
Фиг.7.а



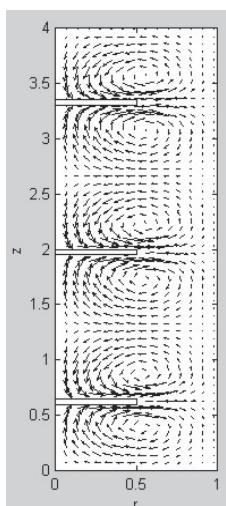
Фиг.7.б



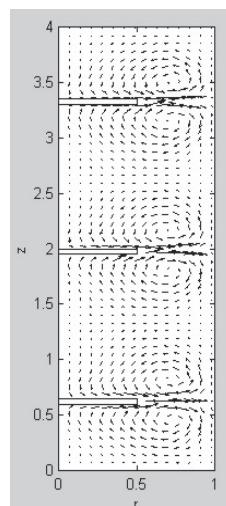
Фиг.7.в



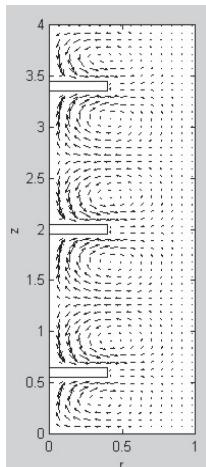
Фиг.8.а



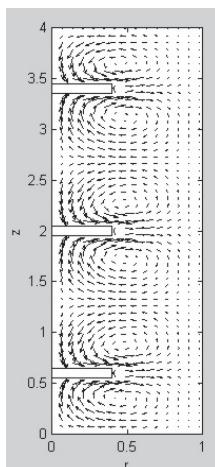
Фиг.8.б



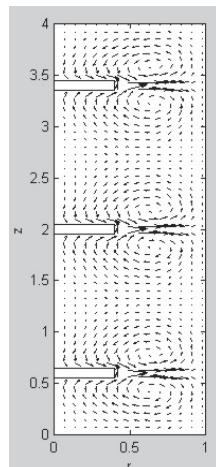
Фиг.8.в



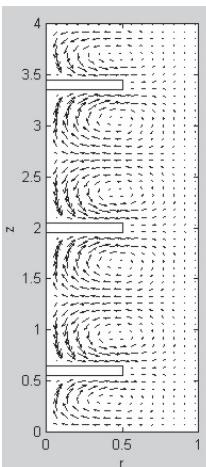
Фиг.9.а



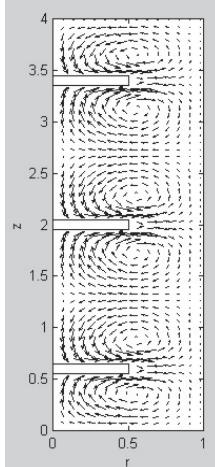
Фиг.9.б



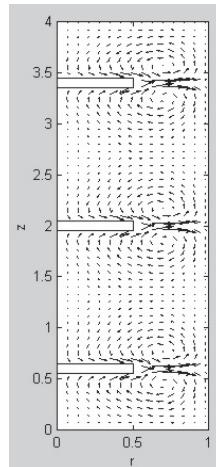
Фиг.9.в



Фиг.10.а



Фиг.10.б



Фиг.10.в

Изследвано е влиянието, което оказва отношението между радиуса и височината на биореактора върху поведението на флуида. Съпоставката е направена между биореактор с отношение $R:Z = 1:5$ между радиуса и височината [3,4,5,6,11] и биореактор с отношение $R:Z = 1:4$ между радиуса и височината.

Броят и храктерът на образуваните вихрови структури се запазва. Променя се интензивността им, като тя е по-голяма в реактор с отношение $R:Z = 1:4$. При този биореактор разстоянието между бъркалките е по-малко в сравнение с по-високия биореактор, което води до увеличаване на интензивността на вихрите, следователно разбъркването в него е по-добро.

Този извод е в добро съответствие с изследванията, представени от Бейкър и съавтори [10]. Получените числени резултати съответстват на резултатите за поведението на флуида в [10]. За да се увеличи интензивността на потоците при реактори с отношение на радиуса към височината $R:Z > 1:3.5$, оборудването само с

една бъркалка не е достатъчно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направено е параметрично изследване на поведението на флуида при промяна на геометричните характеристики на бъркалките за няколко различни стойности на динамичния параметър число на Рейнолдс $Re = 10, 100, 500$.

При промяна на геометричните характеристики се наблюдава промяна в интензивността и местоположението на центровете на вихровите флуидни структури, като характерът им се запазва, а местоположението на центровете им се изтегля към стената на биореактора и към нивото на съответните бъркалки.

Направен е извод от параметричния анализ на влиянието, което оказва отношението между радиуса и височината на биореактора върху поведението на флуида вътре в него. Този извод потвърждава заключението, че за да се увеличи интензивността на потоците в биореактори с отношение на радиуса към височината $R:Z > 1:3.5$, както и да се подобри разбъркването в целия обем на биореактора, оборудването само с една бъркалка не е достатъчно.

Литература

- [1] Герасимов Б., Вислов В. и др., Математическое моделирование дискового смесителя, Москва, 1987
- [2] Гольдштик М.А., Вихревые потоки, Наука, Новосибирск, 1981
- [3] Желева И., Математическо моделиране на хидродинамиката и топломасообмена в химикотехнологични процеси, Дисертация за присъждане на научна степен „Доктор на науките”, Русе, 2015
- [4] Желева И., Лечева А., Изследване влиянието на разположението на бъркалките върху хидродинамиката в химически реактор с три бъркалки, Научни трудове РУ „А. Кънчев” 2001, Том 38, Серия 9, стр. 86 – 90
- [5] Желева И., Лечева А., Числен алгоритъм за изследване на хидродинамиката в реактор с три бъркалки, Научни трудове РУ „А. Кънчев” 2001, Том 38, Серия 10, стр. 250 – 256
- [6] Желева И., Лечева А., Числено изследване на хидродинамиката в химически реактор с бъркалки, Научни трудове РУ „А. Кънчев” 2001, Том 38, Серия 5, стр.83–91
- [7] Запрянов Запрян, Хидродинамика, УИ Св. Климент Охридски, София, 1996
- [8] Лечева А., Иванка Желева - научен ръководител, Числено изследване на хидродинамиката в цилиндрични реактори с механично разбъркване, Дисертационен труд за присъждане на образователната и научна степен „доктор“, Русе, 2013
- [9] Роуч П., Вычислительная гидродинамика, Мир, Москва, 1980
- [10] Bakker A., Van den Akker H.E.A., Single-phase flow in stirred reactors, Chemical engineering research and design, TranslChemE, Vol. 72, number A4, 1994, pp 583-593
- [11] Zheleva I., Lecheva A., Numerical Investigation of Hydrodynamics in Stirred Bioreactors with Multiple Impeller, 9th workshop on Transport phenomena in two-phase flow, Borovets'2004, August 27 – September 1, pp.189-196

За контакти:

гл.ас.д-р Анна Лечева, Катедра „Математика”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 430, e-mail: alecheva@uni-ruse.bg

доц. дмн Иванка Желева, Катедра „Топлотехника, хидравлика и екология”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 585, e-mail: izheleva@uni-ruse.bg
инж. Милен Неделчев, Коника Минолта България ЕООД, e-mail: m.nedelchev74@gmail.com

Докладът е рецензиран.