

Рационално и ефективно използване на енергия при производствени процеси в химическата, биохимическата и хранително-вкусовата промишленост

II. Схеми и метод за синтез при директна топлинна интеграция

Б. Иванов, Д. Добружалиев, А. Ангелов

Abstract: The problem of heating and cooling of batch reactors is considered. Heat integration opportunities in a hot-cold reactor system are discussed. A method is proposed, which combines simultaneously heat recuperation and temperature correction by external heating and/or cooling agents. A method of parametric synthesis of such heat integration systems is proposed by formulating the problem in terms of non-linear programming.

Key words: Batch reactors, Heat integration, Non-linear programming.

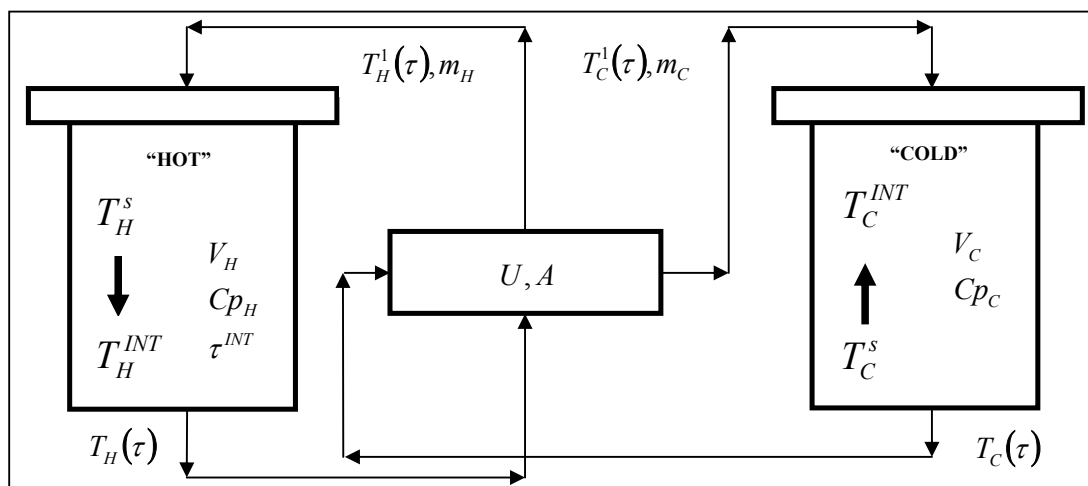
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Проблемът за намаляване на енергопотреблението при работата на периодични биореактори е изключително актуален. Това с особена сила се отнася до фармацевтичната промишленост, характеризираща се с множество производства най-често използващи биореактори за извършване на основните операции. Намаляване на енергозависимостта на такива производства може да се достигне чрез използване на вътрешната енергия в системата, както е показано в първата част на това изследване. Предложеният метод за анализ на възможностите за икономия на енергия, чрез методите на топлинната интеграция може да се използва за решаване на следващата стъпка, а именно решаване на синтезната задача. Задачата, която е поставена за решаване в настоящото изследване е да бъде създаден метод за параметричен синтез на системи за топлинна интеграция и последваща корекция.

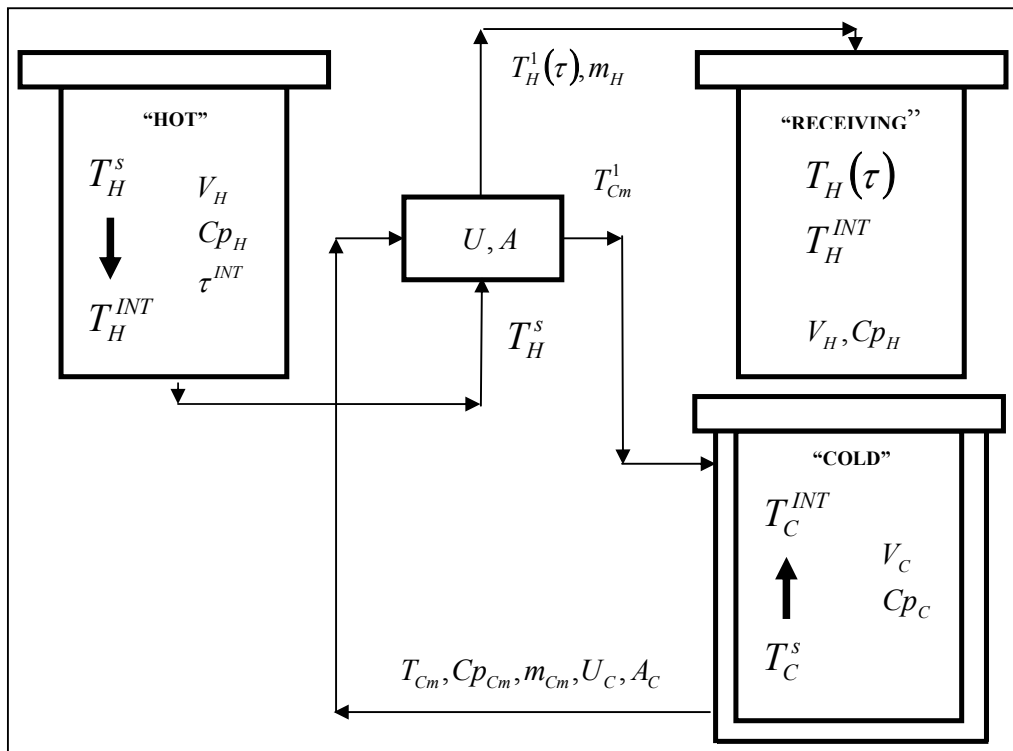
2. СХЕМИ ЗА ТОПЛИННА ИНТЕГРАЦИЯ И КОРЕКЦИЯ

Показаните по-долу схеми представляват една малка част от възможните варианти. При всяка една от схемите, обаче се използват за градивни елементи рекуперативни топлообменни апарати, змиевици, ризи или други устройства, за които могат да се използват предложените математични модели.

2.1. Схеми за директна топлинна интеграция

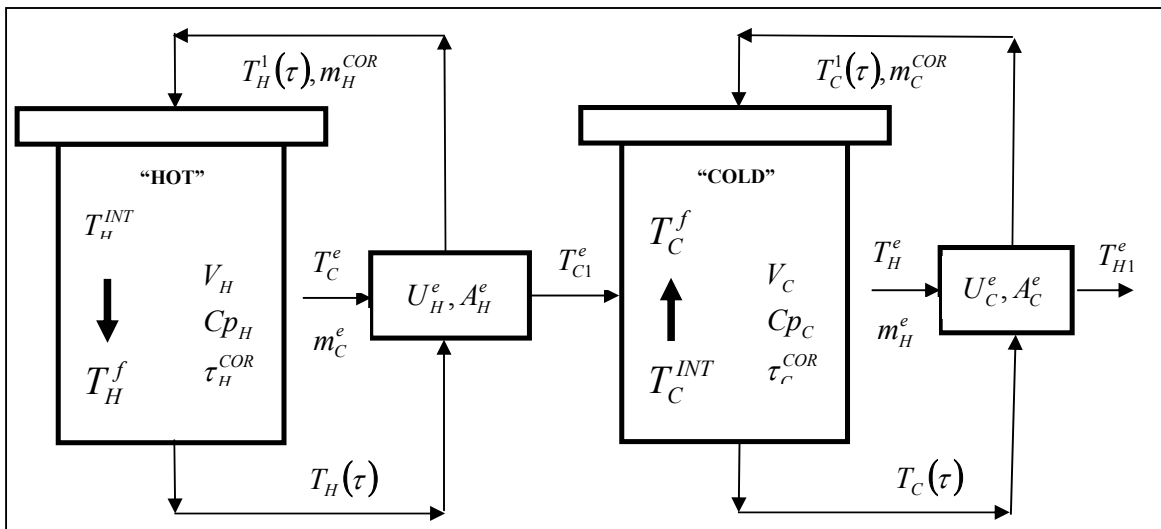


Фиг.1. Директна топлинна интеграция с топлообменен апарат



Фиг.2. Топлинна интеграция с междинен флуид, топлообменник и резервоар

2.2. Схема за топлинна корекция



Фиг.3. Схема на топлинна корекция

2. МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА ТОПЛИННО-ИНТЕГРИРАНИ СИСТЕМИ

2.1. Математичен модел на процесите на топлинна интеграция и корекция

Математичните модели на процесите на топлообмен са валидни при следните допускания:

1. Реакторите са с идеално смесване.
2. Топлинните капацитети и коефициентите за топлопреминаване са константи.
3. Минималната температурна разлика ΔT_{\min} е предварително зададена.

4. Преходните процеси при топлопреминаването са пренебрежимо малки.

5. Топлинните загуби са пренебрежимо малки и не се отчитат.

Схемите за топлинна инеграция, работещи в зададен времеви интервали имат три основни групи съоръжения: (1) реактори без топлообменни системи, (2) реактори със ризи или змиевици (3) топлообменни апарати за нагриване/охлаждане.

Математичните модели, описващи процесите «Нагриване/Охлаждане» за всеки един от основните елементи, изграждащи възможните схемни решения имат вида:

(1) *Топлообменни процеси в реактор без топлообменни системи.*

Предполага се, че в реактора влиза от вън флуид с температура T_1 и дебит m и зададен топлинен капацитет C_p . В същото време в реактора с обем V_b се извършва процес на идеално смесване и от изхода на реактора се извежда флуид със същия дебит m . Температурата на сместта във времето е T_b и се описва от уравнението:

$$\frac{dT_b}{d\tau} = \frac{m}{V_b}(T_1 - T_b), \quad (1)$$

където, в случаите когато $T_1 > T_b$ имаме процес нагриване, докато при $T_1 < T_b$ имаме процес охлаждане на съдържимото в реактора.

(2) *Топлообменни процеси в реактор с ризи или змиевици за нагриване/охлаждане*

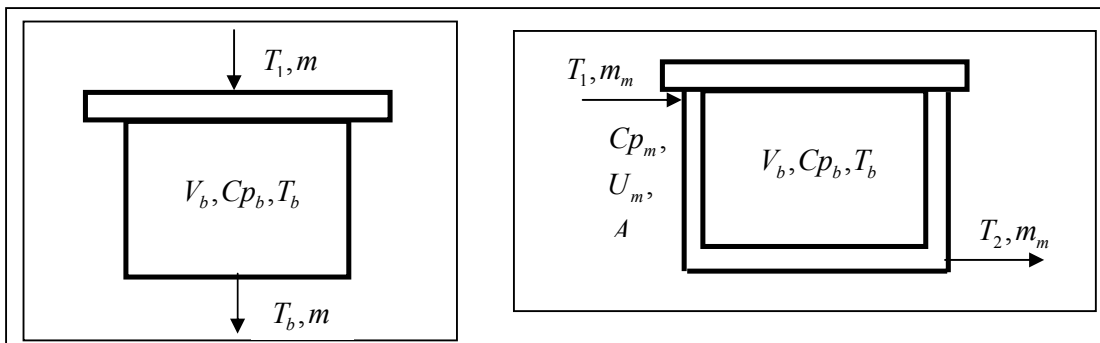
При този тип реактори с обем V_b и съдържимо в него с топлинен капацитет C_{p_b} топлинната риза или змиевик е със зададена топлообменна повърхност A_b и общ коефициент на топлопреминаване U_m . През топлинната риза/змиевик протича външен топлоносител/хладоагент с дебит m_m , топлинен капацитет C_{p_m} и входяща температура T_1 . Температурата на сместта в реактора T_b съгласно *Chisholm D. (1988)* [2] се описва от уравнението:

$$\frac{dT_b}{d\tau} = \frac{(\Phi_m - 1)(m_m C_{p_m})}{\Phi_m V_b C_{p_b}}(T_1 - T_b), \quad (2)$$

където, $\Phi_m = \frac{T_b - T_1}{T_b - T_2} = \exp\left(\frac{U_m A_m}{m_m C_{p_m}}\right)$,

а T_2 е температурата на изход от ризата/змиевика и е:

$$T_2 = \frac{(\Phi_m - 1)}{\Phi_m} T_b + \frac{1}{\Phi_m} T_1. \quad (3)$$



(3) *Топлообменни процеси в рекуперативни топлообменни апарати.*

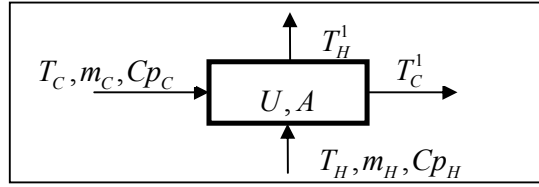
Математичният модел на процесите на топлообмен при работата на противоточни топлообменни апарати според *Kanavetz G.E. (1979)* [1] е:

$$T_H^1 = T_H - (T_H - T_C)\Phi e, \quad (4)$$

$$T_C^1 = T_C + (T_H - T_C)k\Phi e, \quad (5)$$

$$\text{където, } k = \frac{T_C - T_C^1}{T_H^1 - T_H} = \frac{m_H C_{pH}}{m_C C_{pC}}, \quad w = \frac{1}{m_H C_{pH}} - \frac{1}{m_C C_{pC}}, \quad \Phi e = \frac{T_H^1 - T_H}{T_H^1 - T_C} = \frac{1 - \exp(-wUA)}{1 - k \exp(-wUA)},$$

U е коефициент на топлопреминаване, а A -топлообменната повърхност.



По-горе показаните модели за описание на топлообменните процеси в отделните елементи от които са изградени разглежданите схеми се използват за получаване на моделите за всяка една от схемите.

2.1.1. Математичен модел на процесите на топлинна интеграция

Математичният модел на процеса на топлинна интеграция в двойката «Г-С» апарати за схемата, показана на фиг.1 се описва от системата диференциални уравнения съответно за «С» и «Г» реактори, както е показана по-долу:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_H}{d\tau} &= G_H T_H^1 - G_H T_H \\ \frac{dT_C}{d\tau} &= G_C T_C^1 - G_C T_C \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} T_H^1 &= T_H - (T_H - T_C) \Phi e \\ T_C^1 &= T_C + (T_H - T_C) k \cdot \Phi e \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$\text{където, } G_H = \frac{m_H}{V_H}, \quad G_C = \frac{m_C}{V_C}, \quad k = \frac{m_H C_{pH}}{m_C C_{pC}}, \quad w_1 = \frac{1}{m_H C_{pH}} - \frac{1}{m_C C_{pC}}, \quad \Phi e = \frac{1 - \exp(-w_1 UA)}{1 - k \exp(-w_1 UA)}.$$

Замествайки T_H^1 , T_C^1 (7) в уравнение (6) и извършвайки съответните преобразувания за решението при началните условия $T_H(0) = T_H^s$ и $T_C(0) = T_C^s$ се записват уравненията:

$$\left. \begin{aligned} T_H(\tau) &= v_1 \exp(r_1 \tau) + v_3 \\ T_C(\tau) &= v_2 \exp(r_1 \tau) + v_3 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\text{където, } v_1 = (T_H^s - v_3), \quad v_2 = (T_C^s - v_3), \quad v_3 = \frac{(V_H C_{pH} T_H^s + V_C C_{pC} T_C^s)}{(V_H C_{pH} + V_C C_{pC})}, \quad r_1 = -\Phi e (G_H + G_C k).$$

Използвайки описания подход могат да бъдат получени зависимостите описващи процесите във времето за всяка една от показаните схеми. Тези зависимости са необходими за решаване на задачата за синтез.

2.1.2. Математичен модел на процесите на топлинна корекция

Математичният модел на процеса на топлинна корекция в двойката «Н-С» апарати се описва от диференциални уравнения съответно за «С» и «Н» реактори, както е показана по-долу:

$$\left. \begin{aligned} T_H(\tau) &= T_C^e + (T_H^{INT} - T_C^e) \exp(r_1 \tau) \\ T_C(\tau) &= T_H^e + (T_C^{INT} - T_H^e) \exp(r_2 \tau) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

където, $r_1 = a_{11}^H$, $r_2 = a_{11}^C$. За схемата на корекция от фиг. 3 има вида:

$$a_{11}^H = -G_H \Phi e_C^e, \quad a_{11}^C = -G_C k_C^e \Phi e_C^e \quad (10)$$

$$G_C = \frac{m_C^{COR}}{V_C}, \quad k_C^e = \frac{m_H^e C_{pH}^e}{m_C^{COR} C_{pC}}, \quad w_C^e = \frac{1}{m_H^e C_{pH}^e} - \frac{1}{m_C^{COR} C_{pC}}, \quad \Phi e_C^e = \frac{1 - \exp(-w_C^e U_C^e A_C^e)}{1 - k_C^e \exp(-w_C^e U_C^e A_C^e)},$$

При зададени параметри на системите за корекция на «Г» ($A_H^e, U_H^e, T_C^e, m_C^e, m_H^{COR}$) и «С» ($A_C^e, U_C^e, T_H^e, m_H^e, m_C^{COR}$) реактори, то използвайки (9) за времената на извършване на процесите корекция за двата реактора се записват зависимостите:

$$\tau_H^{COR} = \frac{\ln\left(\frac{T_H^f - T_C^e}{T_H^{INT} - T_C^e}\right)}{r_1}, \quad \tau_C^{COR} = \frac{\ln\left(\frac{T_C^f - T_H^e}{T_C^{INT} - T_H^e}\right)}{r_2} \quad (11)$$

2.2. Синтез на система за директна топлинна интеграция и корекция

Както бе описано в т.2.1 процесите «Нагриване» и «Охлаждане» се осъществяват в зададени времеви интервали, като двата процеса започват едновременно. Процесът «Интеграция» се осъществява от система за топлинна интеграция с използване на една от схемите, показани в т.1.1 и процесът «Корекция» с помощта на система за автономно нагриване или охлаждане т.1.2.

При задачата за синтез трябва да се даде отговор на следните въпроси:

1. Каква схема за топлинна интеграция да бъде използвана?
 2. Какви са конструктивните и режимни параметри на инсталираните теплообменни апарати и спомагателни съоръжения, осъществяващи интеграцията?
 3. Какви са основните конструктивни и режимни параметри на системата за топлинна корекция?
 4. Каква е икономическата ефективност в резултат на интеграцията?
- а) Формулиране на задачата за синтез на топлинно интегрирана система в двойка реактори в зададен времеви интервал**

За разглежданите схеми за топлинна интеграция (Фиг.1,Фиг.2), процесът се осъществява във времеви интервал τ^{INT} . Формулира се целева функция в която са отразени експлоатационните разходи свързани с работата на цялата система и капиталните разходи, необходими за построяването и.

Целевата функция в обобщен вид е:

$$F^S = \left(\frac{H}{\tau_B}\right) E_{COST} + \left(\frac{1}{Pb}\right) C_{COST}, \quad (12)$$

H -работните часове на инсталацията за едногодишен период,

τ_B -периода на повторяемост на процеса «Нагриване-Охлаждане»,

Pb -нормативен срок за откупуване на инвестицията, приет в съответната област,

E_{COST} -цената на използваната топло и хладо енергия от външните източници,

C_{COST} -цената на съоръженията, необходими за осъществяване на процесите.

$$E_{COST} = c_H Q_H + c_C Q_C + c_E Q_E, \quad (13)$$

където, c_H, c_C, c_E е цената на единица топло, хладо и електроенергия, а Q_H, Q_C, Q_E е количеството от съответния вид, което се използва за осъществяване на един цикъл на процеса определен според зависимостите (14):

$$\left. \begin{aligned} Q_H &= V_H C_{pH} (T_H^{INT} - T_H^f), \quad Q_C = V_C C_{pC} (T_C^f - T_C^{INT}) \\ Q_E &= \tau_H^{INT} (p_H m_H + p_m m_{Cm}) + \tau_C^{INT} (p_C m_C + p_m m_{Hm}) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

където, p_H, p_C и p_m са мощностите на помпите, необходими за на циркулацията за единица дебит m_H, m_C, m_m на съответните флуиди в процеса на работа на системата.

Капиталните разходи C_{COST} се определят чрез корелационните зависимости, които са приети при проектиране на системата (15):

$$C_{COST} = C_{COST}^{INT} + C_{COST}^{COR}, \quad (15)$$

където, C_{COST}^{INT} е цената на системата за топлинна интеграция, която е (16):

$$C_{COST}^{INT} = \alpha A^\beta + \alpha_H m_H^{\beta_H} + \alpha_C m_C^{\beta_C} + \alpha_{Cm} A_C^{\beta_e} + \alpha_{Cm} m_{Cm}^{\beta_{Cm}} + \alpha_H A_H^{\beta_H} + \alpha_{Hm} m_{Hm}^{\beta_{Hm}} \quad (16)$$

$\alpha, \beta, \alpha_H, \beta_H, \alpha_C, \beta_C, \alpha_{Cm}, \beta_{Cm}, \alpha_{Hm}, \beta_{Hm}$ са корелационни коефициенти за определяне на цената на съоръжението според неговия характерен параметър.

C_{COST}^{COR} е цената на автономната системата за топлинна корекция в зависимост от използваната схема за тази цел и има вида (17):

$$C_{COST}^{COR} = \left. \begin{aligned} & \alpha_e (A_H^e)^{\beta_e} + \alpha_p (m_C^e)^{\beta_p} + \alpha_p (m_H)^{\beta_p} + \alpha_e (A_C^e)^{\beta_e} + \\ & \alpha_p (m_H^e)^{\beta_p} + \alpha_p (m_C)^{\beta_p} + \alpha_j (A_C)^{\beta_j} + \alpha_j (A_H)^{\beta_j} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

където, $\alpha_e, \beta_e, \alpha_p, \beta_p, \alpha_j, \beta_j$ са корелационни коефициенти за определяне на цената на съоръжението според характерения му параметър.

При така формулираната целева функция (12) задачата за параметричен синтез на избраната схема за топлинна интеграция и корекция се формулира като задача на математичното нелинейно програмиране при която се търсят стойности на вектора на независимите променливи, които осигуряват минимум на целевата функция (12) $MIN(F^S)$ при изпълнение на системата конструктивни и режимни ограничения, които са формулирани съгласно неравенствата (18)-(24):

$$T_H^{INT} \geq T_H^f, \quad T_C^{INT} \leq T_C^f \quad (18)$$

$$\tau_C \geq \tau^{INT} + \tau_C^{COR}, \quad \tau_H \geq \tau^{INT} + \tau_H^{COR} \quad (19)$$

$$0 \leq \tau^{INT} \leq \tau_H, \quad 0 \leq \tau^{INT} \leq \tau_C \quad (20)$$

$$0 \leq \tau_H^{COR} \leq \tau_H, \quad 0 \leq \tau_C^{COR} \leq \tau_C \quad (21)$$

$$\Delta T_H \geq \Delta T^{\min}, \quad \Delta T_C \geq \Delta T^{\min} \quad (22)$$

$$A_{He}^{\min} \leq A_{He} \leq A_{He}^{\max}, \quad A_{Ce}^{\min} \leq A_{Ce} \leq A_{Ce}^{\max} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} & 0 \leq m_H \leq m_H^{\max}, \quad 0 \leq m_C \leq m_C^{\max} \\ & 0 \leq m_{He} \leq m_{He}^{\max}, \quad 0 \leq m_{Ce} \leq m_{Ce}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Формулираната по-горе задача за синтез е задача на математичното нелинейно програмиране при непрекъснати независими променливи може да бъде решена чрез използване на известни методи и достъпни програмни средства, като GAMS Brooke A.D. et al. (1998) [4] и др.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kanavetz G.E., Generalized methods for heat exchanger design, Naukova Dumka, Kiev, pp. 113-122, 1979 (in russ.).

[2] Chisholm D., Heat Exchanger Technology, Elsevier, Applied Science Publishers Ltd, pp. 169-176, 1988.

[3] Ivanov B., K. Peneva, N. Bancheva, Heat Integration of Batch Vessels at Fixed Time Interval. I. Schemes with Recycling Main Fluids, Hung. J. Ind. Chem., **20**, pp.225-231, 1992.

[4] Brooke A., D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, GAMS: A User's Guide, GAMS Development Corporation, Washington, 1998.

За контакти:

Доц. д-р. Боян Иванов, Институт по инженерна химия - БАН,
София, ул. Акад. Г. Бончев, блок 103, E-mail: bivanov@bas.bg

Доц. д-р. Драгомир Добружалиев, Университет "Проф. д-р Асен Златаров",
Бургас, E-mail: dragodob@yahoo.com

Инж. Ангел Ангелов, «ПОБЕДА» - АД, Бургас, E-mail: angelov@pobeda-ad.com

Докладът е рецензиран.