



## **Multimodel Approach for Defects Evaluation in Infrared Diagnostics of the Steel Ladle**

Ivanka S. PETROVA, Emil MIHAILOV

University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria  
e-mails: [petrovaivanka09@gmail.com](mailto:petrovaivanka09@gmail.com); [emilgmihailov@gmail.com](mailto:emilgmihailov@gmail.com)

### **Abstract**

In this paper are represented the results from the capability evaluation for establishing small size defects with crack shape in the area of the joints between the refractory bricks. For the investigation of methods for complex approach are developed and embedded upon diagnostic and evaluation of the equipment condition, based on the use of the results from the thermographic measurements in combination with those from mathematical simulation of the transient heat transfer (describing the heat exchange processes and temperature fields depending on the insulation thickness, type of refractory materials and conditions of operation).

A multi-model approach has been suggested for evaluation of the defect criticality with the purpose of diagnostic of the condition and taking a decision on the maintenance and operation of the steel cast ladle.

**Keywords:** Infrared thermovision, Mathematical modelling, Metallurgical ladle, Damage Detection and Diagnosis

## **Мултимоделен подход за оценяване на дефекти при инфрачервена диагностика на стената на стоманоразливна кофа**

Иванка ПЕТРОВА, Емил МИХАЙЛОВ

### **1. Увод**

В процеса на експлоатация, огнеупорната изолация на високотемпературните агрегати в промишлеността е подложена на влиянието на термичните напрежения и химическото и физическо въздействие, вследствие изливането на течен метал, довеждайки до нейното износване, увеличаване на топлинните загуби и до влошаване на топлообмена. Разрушаването на изолацията е опасно и може да засегне структурната цялост на агрегатите. Безразрушителния контрол и мониторинг на изолацията, съчетани със съответните коригиращи действия водят до по-добра сигурност, контролирана поддръжка и по-дълъг живот на изолацията на тези агрегати [1-2].

Инфрачервените камери са перфектно решение за безконтактен мониторинг на енергетичните инсталации по време на тяхната работа. Прилагането на безконтактните методи позволява повишаване на сигурността на работа и оптимизирането на замяната на огнеупорната зидария при оптимизиране на разходите.

Предсказващото поддържане (Predictive Maintenance) на технологичните съоръжения и агрегати, основаващо се на оценка на текущото им състояние (Condition Based Maintenance) удължава живота им, намалява престойте, поддържа оптималното ниво на производството, гарантира спазване на точния срок на доставка на продукцията (суровини, материали, енергия). Този вид поддържане позволява ефективен мениджмънт на поддръжката на съоръженията чрез използване на ограничен по брой персонал и намалени разходи за текущи и основни ремонти според действителното състояние на машините и апаратите. За оценка на състоянието на огнеупорната изолация при всеки работен цикъл на кофата се използват различни подходи, като се започне с визуална

оценка от експерти и се стигне до съвременни системи за инфрачервена термография [3] и системи за лазерно сканиране на вътрешността на металургична кофа [4].

Контролът и периодичния мониторинг на състоянието на стоманоразливната изискват интегрирана информационна система с отчитане на измерените нива на параметрите от електродъговата пещ[5], през вторичната обработка до непрекъснатото леене на стоманата с подходящо избран онлайн модел.

За реализиране на процедурите по поддръжка на базата на реалното състояние на агрегатите и предсказващото поддържане в практиката на водещи производители се разработват компютърни информационно-диагностични системи, за наблюдение на процеса и събиране на данни за реалните нива технологични параметри и текущото състояние на отделните агрегати през целия им жизнен цикъл.[6-8]

При диагностициране на състоянието на огнеупорната изолация се прилагат различни методи [9-11] и подходи като в основата стои информацията, получена в резултат на термографското измерване. При прилагането на този метод на получаване на първична информация е необходимо да бъдат отчетени редица фактори, засягащи технологичните, конструкционни и топлотехнически особености на изследваните обекти. Също така от особена важност е и ситуирането на агрегатите и възможността за провеждане на измервания.

Настоящата разработка представя резултатите от проведена оценка на възможностите за установяване на дефекти с формата на разширяващи се вертикални пукнатини, формиращи се в огнеупорната изолация на стоманоразливните кофи.

## **2. Технологични особености на процесите на добиване на стоманата**

В съвременните условия на производство на стомана при интензифициране на процесите с цел увеличаване на производителността на свръхмощните електростоманодобивни пещи (ЕСДП), времето на процесът на топене на метала е значително по-късо, а рафинирането на метала се провежда в инсталации за извънпещно обработване (ИО). Това определя ролята на стоманоразливните кофи като основно звено в технологическия процес на добиване на стоманата. Тяхната устойчива работа, като агрегат, в който течният метал престоива през по-голяма част от времето от общия технологичен процес до края на разливането, е пряко свързана със сигурността на протичане на отделните процеси на обработване и определя работата на цялата технологична линия. Това насочва вниманието към изградената с огнеупорни материали изолация, за чието състояние трябва да бъде следено и е обект на периодичен мониторинг.

През периода на своята експлоатация стоманоразливната кофа престоива на различни позиции в цеха в зависимост от етапа на обработване на стоманата. Всяка от тези позиции се характеризира с различни възможности за достъп и провеждане на термографски измервания на повърхността на кофата.

## **3. Резултати и дискусия**

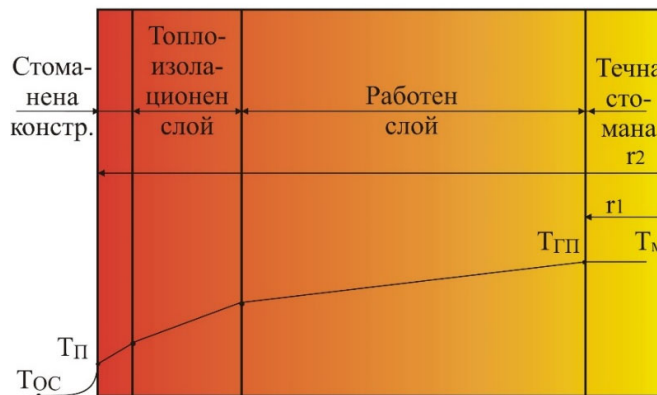
За провеждане на изследването, при отчитане на условията, при които протичат процесите са използвани резултатите от работата на разработения за целите на подобни изследвания тримерен математичен модел [12] на огнеупорната изолация.

Общата дебелина на изолацията е 0.280м. Изградена е от два слоя външен – (топлоизолационен) състоящ се от магнезитов огнеупор с дебелина 0.065м и вътрешен (работен), контактуващ с течния метал изграден от хром-магнезитов материал с дебелина 0.215м. Стоманеният кожух, обхващащ двата слоя е с дебелина 0.02м.

Конструкцията на стоманоразливната кофа е представена на фигура 1.

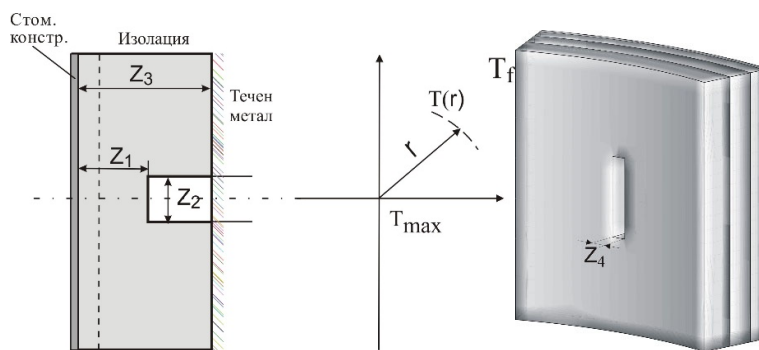
Огнеупорите при тези агрегати работят при тежък режим. При провеждането на технологичния процес се получават високи температури, а движението на метала е интензивно. Между две зареждания зидарията е подложена на топлосменни и температурни промени. Ето защо зидарията на огнеупорния работен слой трябва да има висока термохимична и механична устойчивост.

За безпроблемната работа на кофата е необходимо познаването на остатъчната дебелина на изолацията както в отделни проблемни участъци, изразяващи се в локални износвания или разрушаване на отделни елементи от зидарията, при което съществува потенциална опасност от пробив и изтичане на метала, така и на общата ѝ дебелина. Тази остатъчна дебелина и локални износвания и разрушения могат да бъдат определени при провеждане на периодичен мониторинг на кофата на етапи от нейната експлоатация.



Фиг. 1. Схема на стената на стоманоразливната кофа.

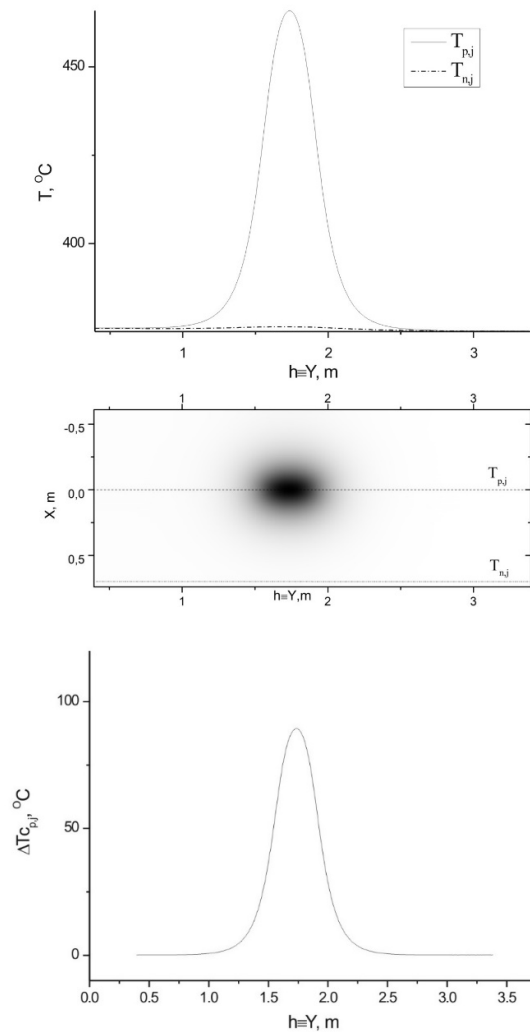
За провеждане на изследването е разгледан дефект с формата на права триъгълна призма, наподобяващ дефект в резултат на разширяваща се пукнатина или фуга в огнеупорната зидария на кофата. Схематично представяне на конфигурация на вертикален дефект между две огнеупорни тухли и приетите обозначения е визуализирано на фигура 2. Целта е да бъде изследвано температурното състояние на повърхността при различни остатъчна дебелина в областта на дефекта –  $Z_1$ , височина –  $Z_2$  на повредата, степен на общото износване на стената –  $Z_3$  и широчина на дефекта –  $Z_4$  (приета за постоянна).



Фиг. 2. Схематично представяне на дефекта и приетите означения.

Разработен е план провеждане на експеримента. Прието е широчината на повредата на вътрешната повърхност на стената да бъде постоянна и с максимално допустимия в практиката размер  $Z_4 = 0,021\text{m}$ , а останалите три параметъра да бъдат изменяни на три нива: минимално (-1), средно (0) и максимално (+1), при което е планиран и реализиран пълен факторен експеримент, изискващ провеждане на 27 броя експерименти.

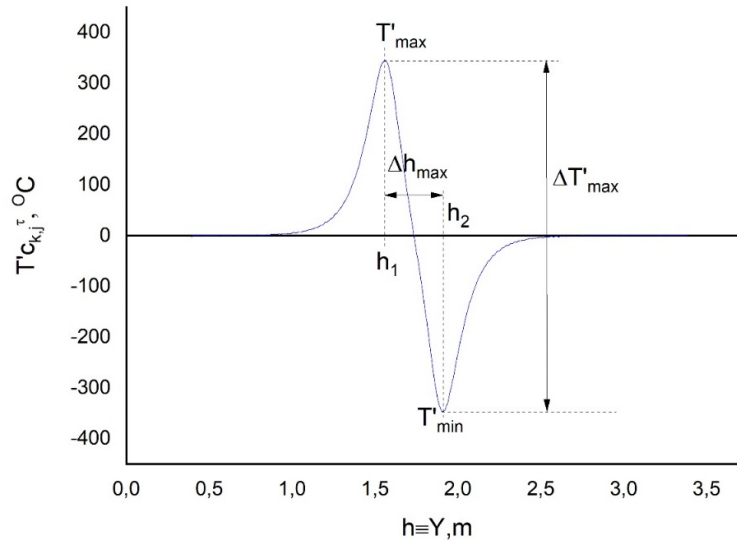
За установяване на връзката между параметрите на горещото петно и геометричните размери на повредата  $Z_1$  и  $Z_2$  е проведено изследване на температурното разпределение по височина на горещото петно. За целта са отчетени температурите по вертикалната ос на горещото петно и е определен температурния контраст  $\Delta T_{c_{p,j}} = T'_{p,j} - T'_{n,j}$  (фигура 3). Производната  $T'_{c_{p,j}}$  на температурния контраст по височина на оста на горещото петно е представена на фигура 4.



**Фиг. 3. Температурен контраст по вертикалната ос на горещото петно.**

От фигура 4 се вижда, че по производната се наблюдават екстремални точки. Това са локалният максимум и локалният минимум-  $T'_{\text{max}}$  и  $T'_{\text{min}}$ . По оста  $h=Y$  (височината на стената) те имат проекции  $h_1$  и  $h_2$ . При отчитане на стойностите  $\Delta h_{\text{max}}=h_2-h_1$  и  $\Delta T'_{\text{max}}=T'_{\text{max}}-T'_{\text{min}}$  е определено съотношението  $\Delta T'_{\text{max}} / \Delta h_{\text{max}} = (\Delta T' / \Delta h)_{\text{max}}$ .

За извеждане на зависимости между размерите на дефекта и износването на огнеупорната изолация, характеризирани със  $Z_1, Z_2, Z_3$  и максималната температура на горещото петно от повърхността на кофата, е приложен мултимоделен подход [14]. Той се основава на разделяне на диапазона на операционните условия на области, за които са валидни опростени „локални“ модели, които се превключват в зависимост от това, в коя зона се намира текущото състояние или режим на съоръжението.



**Фиг. 4. Изменение на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно.**

За диагностика на дефекти в изолацията на стоманоразливна кофа параметричното пространство по отношение на остатъчната дебелина на изолацията в участъка пред на повредата  $Z_1$  е разделено условно на две части:

- с диапазон на изменение  $0,11\text{m} \leq Z_1 \leq 0,15\text{m}$  – зона, в която тежестта на дефекта може да бъде класифицирана като лека;
- с диапазон на изменение  $0,07\text{m} \leq Z_1 \leq 0,11\text{m}$  – зона на повишено внимание, в която се взема решение за интервала на провеждане на диагностичните процедури и спиране на кофата за ремонт при класифициране на дефекта като тежък, поради достигане на износването до критичния размер.

За провеждане на изследването чрез приложение на мултимоделния подход зоната на повишено внимание е разделена на четири области (таблица 1) както следва:

**Таблица 1. Интервали на изменение на параметрите в отделните области**

Област A1	Област A2	Област A3	Област A4
$0,23\text{m} \leq Z_3 \leq 0,28\text{m}$	$0,18\text{m} \leq Z_3 \leq 0,23\text{m}$	$0,23\text{m} \leq Z_3 \leq 0,28\text{m}$	$0,18\text{m} \leq Z_3 \leq 0,23\text{m}$
$0,1\text{m} \leq Z_2 \leq 0,2\text{m}$	$0,1\text{m} \leq Z_2 \leq 0,2\text{m}$	$0,2\text{m} \leq Z_2 \leq 0,3\text{m}$	$0,2\text{m} \leq Z_2 \leq 0,3\text{m}$
$0,07\text{m} \leq Z_1 \leq 0,11\text{m}$	$0,07\text{m} \leq Z_1 \leq 0,11\text{m}$	$0,07\text{m} \leq Z_1 \leq 0,11\text{m}$	$0,07\text{m} \leq Z_1 \leq 0,11\text{m}$

Целта на конкретното изследване е да бъдат установени работни зависимости за определяне на остатъчната дебелината на стената  $Z_1$  пред повредата и височината на повредата  $Z_2$  като функции от параметрите на горещото петно. За всяка от четирите области е формирана извадка с данните за нивата на параметрите на общото износване и

локалната повреда на стената и са отчетени стойностите на  $\Delta h_{\max}$ ,  $\Delta T'_{\max}$  и  $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$  от изменението на производната на контраста. За всяка от извадките е проведен отделен регресионен анализ.

В резултат на проведения предварителен корелационен анализ са установени високи стойности на коефициентите на корелация между  $Z_2$  и  $\Delta h_{\max}$ , а на  $Z_1$  с  $\Delta T'_{\max}$  и  $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ . За изследване на взаимовръзките между стойностите на зависимите променливи  $\Delta h_{\max}$  и  $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$  и тези на параметрите на дефекта  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  е проведен регресионен анализ, в резултат на който за всяка зона са изведени уравнения по две уравнения (1)-(2), (3)-(4), (5)-(6) и (7)-(8), представящи връзката между  $Z_2$  и  $\Delta h_{\max}$  и  $Z_1$  с  $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$  или  $\Delta T'_{\max}$ , представени в таблица 2.

Изведените математически модели притежават коефициенти на множествена корелация с високи стойности  $R > 0,99$ . Изчислените стойности за Significance  $F < \alpha(0,005)$ . За избраното ниво на значимост  $\alpha = 0,05$  за всички модели критичната табличната стойност на F-разпределението  $F_t < F$  (F-отношението), което е основание за заключението, че коефициентите на множествена корелация са статистически значими. Може да бъде обобщено, че за избраното ниво на значимост  $\alpha = 0,05$  регресионните модели са статистически значими.

**Таблица 2. Регресионни уравнения по области на зоната на повишено внимание.**

Обл.	Регресионни зависимости	R	F	Sign. F	
A1	$\Delta h_{\max} = 0,027659 + 0,18125 * Z_3 + 0,664125 * Z_2 + 0,777188 * Z_1$	0.99	224	6,5E-05	(1)
	$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} = 4527,12 + 4549,247 * Z_3 - 300,38 * Z_2 - 42618,4 * Z_1$	0.99	343	2,8E-05	(2)
A2	$\Delta h_{\max} = 0,041903 + 0,1995 * Z_3 + 0,676 * Z_2 + 0,5525 * Z_1$	0.99	220	6,8E-05	(3)
	$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} = 3521,29 + 7664,174 * Z_3 - 436,791 * Z_2 - 39175,5 * Z_1$	0.99	272	4,4E-05	(4)
A3	$\Delta h_{\max} = 0,020645 + 0,1638 * Z_3 + 0,84635 * Z_2 + 0,5525 * Z_1$	0.99	116	1,2E-06	(5)
	$\Delta T'_{\max} = 896,2282 + 1592,565 * Z_3 + 468,6375 * Z_2 + 0,499625 * Z_1$	0.99	1631	2,4E-04	(6)
A4	$\Delta h_{\max} = 0,03144 + 0,1642 * Z_3 + 0,86085 * Z_2 + 0,338375 * Z_1$	0.99	185	9,5E-05	(7)
	$\Delta T'_{\max} = 671,749 + 2426,512 * Z_3 + 366,9173 * Z_2 - 9477,38 * Z_1$	0.99	488	1,4E-05	(8)

След регресионен анализ на резултатите от числения експеримент за фоновата температура при различни стойности на остатъчната дебелина на стената е установена следната зависимост:

$$Z_3 = \exp(-3,618 + 807,591/T_f), \quad (9)$$

позволяваща определянето на стойността на общото износване на стената като функция от температурата в бездефектната област.

След преработване на изведените уравнения и заместване на  $Z_3$  от уравнение (9) за отделните области са получени системи (10)-(13) от две уравнения с две неизвестни  $Z_1$  и  $Z_2$ , представени в таблица 3.

**Таблица 3. Системи от уравнения по области на зоната на повишено внимание.**

Обл.	Регресионни зависимости	
A1	$\Delta h_{\max} - 0,027659 - 0,18125 * e^{-3,618 + 807,591/T_f} = 0,664125 * Z_2 + 0,777188 * Z_1$	(10)
	$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} - 4527,12 - 4549,247 * e^{-3,618 + 807,591/T_f} = -300,38 * Z_2 - 42618,4 * Z_1$	

A2	$\Delta h_{\max} - 0,041903 - 0,1995 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 0,676 * Z_2 + 0,5525 * Z_1$	(11)
	$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} - 3521,29 - 7664,174 * e^{-3,618+807,591/T_f} = -436,791 * Z_2 - 39175,5 * Z_1$	
A3	$\Delta h_{\max} - 0,020645 - 0,1638 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 0,84635 * Z_2 + 0,5525 * Z_1$	(12)
	$\Delta T'_{\max} - 896,2282 - 1592,565 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 468,6375 * Z_2 + 0,499625 * Z_1$	
A4	$\Delta h_{\max} - 0,03144 - 0,1642 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 0,86085 * Z_2 + 0,338375 * Z_1$	(13)
	$\Delta T'_{\max} - 671,749 - 2426,512 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 366,9173 * Z_2 - 9477,38 * Z_1$	

Получените системи от уравнения имат решение тъй като детерминантите им са различни от нула.

Решаването на всяка от тези системи линейни уравнения позволява определянето на стойностите на геометричните размери на дефекта  $Z_1$  и  $Z_2$  в съответната област на зоната с повишено внимание на базата на измерените температури и определени с стойности на параметрите на горещото петно.

За изследване на взаимовръзките между стойностите на зависимите променливи  $\Delta h_{\max}$  и  $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$  и тези на параметрите на дефекта  $Z_1$ ,  $Z_2$  в зоната на регулярни измервания е проведен регресионен анализ, в резултат на който са установени уравнения (14) и (15), представени в таблица 4.

Двата математически модела притежават коефициенти на множествена корелация  $R$  с високи стойности. Изчислената стойност за Significance  $F < \alpha(0,005)$ . За избраното ниво на значимост  $\alpha = 0,05$  и за двата модела критичната табличната стойност на  $F$ -разпределението  $F_t(8,72) < F$  ( $F$ -отношението), което е основание за заключението, че коефициентите на множествена корелация и регресионните модели са статистически значими.

Таблица 4. Регресионни зависимости за зоната на регулярните измервания.

Регресионни зависимости	R	F	Signif. F	
$\Delta h_{\max} = 0,0548 + 0,323 * Z_3 + 0,632 * Z_2 + 0,304 * Z_1$	0.97	173	2,6E-11	(14)
$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} = 1374,92 + 3966,69 * Z_3 - 39,359 * Z_2 - 13429,2 * Z_1$	0.97	182	1,8E-11	(15)

След преработване на изведеното уравнения (14) и (15), се получава система от две уравнения (16) и (17) с две неизвестни  $Z_2$  и  $Z_1$ :

$$\Delta h_{\max} - 0,0548 - 0,323 * e^{-3,618+807,591/T_f} = 0,632 * Z_2 + 0,304 * Z_1 \quad (16)$$

$$(\Delta T'/\Delta h)_{\max} - 1374,92 - 3966,69 * e^{-3,618+807,591/T_f} = -39,359 * Z_2 - 13429,2 * Z_1 \quad (17)$$

Получената система от две уравнения с две неизвестни има решение тъй като детерминантата е различна от нула.

Решаването на тази система линейни уравнения позволява определянето на стойностите на геометричните размери на дефекта  $Z_1$  и  $Z_2$  в зоната на регулярните измервания на базата на стойностите на параметрите на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно.

Резултатите от проведеното изследване позволяват:

- определяне на общото износване на стената  $Z_3$  с помощта на измерената фоновата температура в бездефектната област;
- определяне на параметрите на дефекта (остатъчната дебелина на стената в областта на дефекта  $Z_1$  и неговата височина  $Z_2$ ) в зоната на внимание и зоната на регулярните измервания при използване на установените при термографски

измервания параметри на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно;

Приложението на резултатите от термографски измервания на повърхностната температура в установените зависимости позволява определяне на параметрите на повредата с цел диагностициране на състоянието и вземане на обосновано решение за по-нататъшната експлоатация на стоманоразливната кофа или извеждането ѝ за ремонт.

#### **4. Заключение**

При използване на създаден за целите на IR диагностиката 3D математичен модел е проведено изследване, с цел установяване на зависимости за оценяване на състоянието на стената на стоманоразливната кофа.

При провеждане на изследването е отчетено повърхностното температурно поле за различни етапи от експлоатационния цикъл на кофата и размери на повредата. В резултат на регресионен анализ е установена функционална зависимост на износването на стената в резултат на контакта с течната стомана като функция от фоновата повърхностна температура, определена в бездефектната област.

Предложен е мултимоделен подход, основаващ се на разделянето на параметричното пространство на четири участъка и приложение на регресионните зависимости за всеки участък за определяне на остатъчната дебелина стената в областта на дефекта като функция от параметрите на измереното с IR камера повърхностно температурно поле.

При приложение на мултимоделния подход на изследване с цел повишаване на точността на предсказване параметричното пространство на зоната на повишено внимание е разделено на четири области и предназначенията за прогнозиране модели са изведени за всяка от тях.

За прецизно оценяване на тежестта на повредата за всяка област на изследване е изведена и система от две уравнения, съвместното решаване на които позволява определяне на остатъчната дебелина на стената в областта на дефекта и неговата височина.

Установените зависимости може да бъдат приложени при провеждане на диагностични процедури с цел вземане на обосновано решение за по-нататъшната експлоатация или извеждане от експлоатация.

#### ***Благодарности***

Изследванията са проведени с финансовата подкрепа на Министерството на образованието и науката, Национална програма „Млади учени и постдокторанти 2020“.

#### **Литература**

1. Chang L., E.L. Russell, R.D. Braatz, Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems, Springer, 2001.
2. Iserman R., Fault-Diagnosis Systems, Springer, 2006.
3. Thermal Imaging System for a Reliable Condition Monitoring of the Refractory Lining
4. [http://www.pieper-video.com/upload/pdf/downloads/LadleCheck\\_EN.pdf](http://www.pieper-video.com/upload/pdf/downloads/LadleCheck_EN.pdf)
5. Lamm R., S. Kirchhoff, Optimization of ladle refractory lining, gap and crack detection, lining surface temperature and sand-filling of the ladle-taphole by means of a 3d-laserprofile-measurement system that is immersed into a hot ladle to evaluate the entire condition, [http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper\\_rbofbhfcxshpgipoispm.pdf](http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper_rbofbhfcxshpgipoispm.pdf)
6. J. Omori, Blast furnace Phenomena and Modeling, Elsevier, London, 1987, pp. 631.



6. Yemelyanov V., N.Y. Yemelyanova, O.A. Morozova, A.A. Nedelkin, Specialized computer system to diagnose critical lined equipment, International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015, 2018, 052032 DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052032.
7. Yemelyanov V., T. Tochilkina, A. Nedelkin, E. Shved, Automation of monitoring and diagnosing the technical condition of torpedo ladle cars, MATEC Web of Conferences, 16-19 May 2018, Novosibirsk; Ivanka Petrova, Emil Mihailov, Kosta Boshnakov 1113 Russian Federation, Volume 239, DOI: 10.1051/mateconf/201823904003.
8. Yemelyanov V., T. Tochilkina, E. Vasilieva, A. Nedelkin, E. Shved, Computer diagnostics of the torpedo ladle cars, 2018, AIP Conference Proceedings, 2034, art. no. 020008, DOI: 10.1063/1.5067351.
9. Maldagne X.P.V., Theory and practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, John Wiley, NY, 2001.
10. Mihailov Em., V. Petkov, Case-Based Approach for Diagnosis of Metallurgical Ladle Lining, The 4th International Conference Processing and Structure of Materials, Palic, Serbia, 27-29 May, 2010.
11. Petrova, I., Mihailov, E., Boshnakov, K., Decision support system for condition based maintenance of steel casting ladles, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 54(5), 2019, pp. 1103-1113.
12. Smith,R., T. Johansen, Multiple Model Approaches to Modelling and Control, Taylor and Francis: London, UK, 1997