

Лаврухин Андрей Игоревич

Аспирант, Череповецкий государственный университет (Череповец, Россия)

E-mail: wendigoxs@gmail.com

Lavrukhin Andrey Igorevich

Post graduate student, Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)

E-mail: wendigoxs@gmail.com

Селяничев Олег Леонидович

Кандидат технических наук, доцент, Череповецкий государственный университет (Череповец, Россия)

E-mail: selo@chsu.ru

Selyanichev Oleg Leonidovich

PhD (Technology), associate professor, Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)

E-mail: selo@chsu.ru

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ
ШИХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

**THE GEOMETRICAL MODEL
THERMOVISION IMAGE OF RAW
MATERIALS' SURFACE CHARGED
INTO THE BLAST FURNACE**

Аннотация. Под куполом доменной печи расположено загрузочное устройство, тогда как тепловизор расположен периферийно и под углом к вертикали. Модель учитывает как стационарные параметры расположения тепловизора под куполом печи и поле зрения его объектива, так и динамически изменяющееся расстояние от тепловизора до поверхности засыпи шихты, и функционально изменяющийся диаметр шахты доменной печи.

Abstract. Blast furnace usually has charging systems that implement a discharge chute in the throat of the furnace. Whereas thermal imaging camera should be located peripherally at an angle to the vertical. This model takes into account both stationary thermal imaging camera location in the throat of the furnace, objective's field of view and dynamically changing distance from the camera to the surface of charged raw materials, and functionally changing the diameter of the blast furnace shaft.

Ключевые слова. Доменная печь, домна, тепловизионное изображение, тепловизор, геометрическая модель, поверхность шихты.

Key words. Blast furnace, thermal imaging, thermal imaging camera, geometric model, surface of charged raw materials.

Введение

Для решения задачи контроля засыпи шихты с использованием тепловизионной системы [4] необходима полная информация о распределении температуры по всей поверхности уровня засыпи шихты. Предлагается построить геометрическую модель тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты доменной печи, основанную на внутреннем ориентировании одиночных термографических изображений [3]. Геометрическая модель тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты доменной печи – это совокупность точек пересечения соответственных проектирующих лучей тепловизора с условной плоскостью поверхности засыпи.

Для решения поставленной задачи необходимо получить термограмму в мировых координатах доменной печи. Для этого должна быть построена карта соответствия точек термограммы (на картинной плоскости, единицы измерения – пиксели) точкам на поверхности засыпи шихты в натуральную величину (объектная плоскость, единицы измерения – мм). Схема расположения тепловизора, объектной и картинной плоскостей показана на рис. 1, где $(OO'O'')$ – оптическая ось; $(OX'_{\min}X''_{\min})$,

$(OX'_{\max} X''_{\max})$ – трассирующие лучи горизонтальной развертки; $(OY'_{\min} Y''_{\min})$, $(OY'_{\max} Y''_{\max})$ – трассирующие лучи вертикальной развертки; угол $\varphi_h = \angle(X'_{\min} OX'_{\max})$ – максимальный угол зрения объектива по вертикали; угол $\varphi_v = \angle(Y'_{\min} OY'_{\max})$ – максимальный угол зрения объектива по горизонтали.

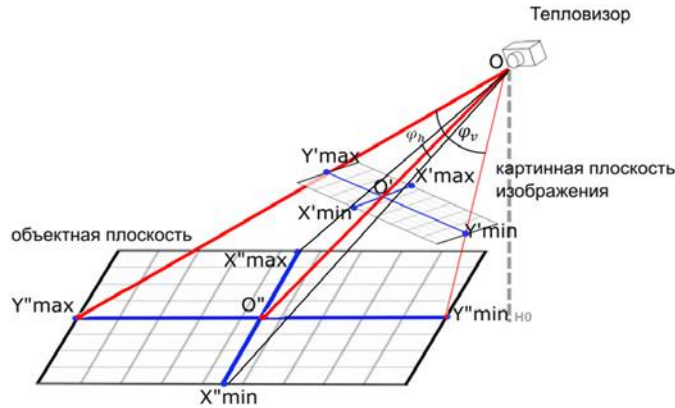


Рис. 1. Схема проекции объектной плоскости на картинную плоскость

Основная часть

В случае ортогонального расположения тепловизора, т.е. когда оптическая ось строго перпендикулярна объектной плоскости и проходит через ее центр O'' , применение настоящей геометрической модели дает такое отображение координат, что полученное изображение мало отличается от исходного изображения. Однако, ввиду устройства доменных печей, в центральной части под куполом печи всегда располагается загрузочное устройство: конусного [1], бесконусного [6] или роторного типа [2], а значит, расположить тепловизионную камеру строго вертикально под куполом печи не представляется возможным. Известна методология измерения реальных объектов по цифровым изображениям, основанная на анализе пар снимков, их взаимного ориентирования, отыскания на каждой паре снимков идентичных (соответственных) точек [5]. Измерения объектов в таком случае хорошо поддаются автоматизации, однако редко, когда есть возможность установки второй идентичной камеры для синхронной съемки внутри доменной печи.

Тепловизор как оптико-электронный прибор позволяет зарегистрировать инфракрасное излучение, собранное и сфокусированное на матрице с помощью объектива. Таким образом, характер искажений отображения реальных объектов аналогичен цифровым фотоснимкам. В случае съемки объектов на расстоянии, значительно превышающем минимальное фокусное расстояние объектива, используется фокусировка на бесконечность. В таком случае можно пренебречь размером диафрагмы объектива и принять ее за точку. Тогда представим процесс получения термограммы как центральное проецирование объектной плоскости на картинную плоскость. При получении термограммы оси симметрии $(X''_{\min} X''_{\max})$ и $(Y'_{\min} Y'_{\max})$ отображаются соответственно в $(X'_{\min} X'_{\max})$ и $(Y'_{\min} Y'_{\max})$ (см. рис. 1). Необходимо решить обратную задачу – для каждой точки p' картинной плоскости найти соответствующую ей точку p'' объектной плоскости.

Применительно к доменной печи тепловизор находится в стационарном положении, в то время как уровень засыпи шихты, а значит, и расстояние от тепловизора до объектной плоскости варьируется, кроме того, изменяется и диаметр поверхности засыпи. Шахта доменной печи имеет сложный вид (рис. 2), и ее диаметр может быть представлен ломаной, где за начало координат $H=0$ принимается уровень колошника (максимальная загрузка печи).

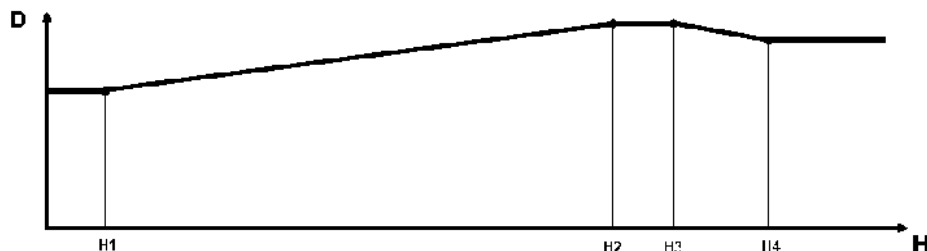


Рис. 2. Изменение диаметра шахты доменной печи №5 Северянка
ПАО «Северсталь»

Для построения проекции необходимо знать значение диаметра шахты печи при различном уровне загрузки шихты. Такая функциональная зависимость $D(h)$ может быть представлена так:

$$D(h) = \begin{cases} 11200, & h \in (0; 2,2) \\ 257,28h + 10634, & h \in (2,2; 22,8) \\ 16500, & h \in (22,8; 24,9) \\ -400h + 26460, & h \in (24,9; 28,4) \\ 15100, & h \geq 28,4, \end{cases} \quad (1)$$

где D – диаметр шахты печи, мм; h – расстояние от колошника печи до уровня загрузки, м.

В общем случае картинная и объектная плоскости не параллельны, и оптическая ось тепловизора не перпендикулярна картинной или объектной плоскости, а значит, на полученном изображении будут значительные искажения истинных размеров и положений объектов. Для устранения искажений необходимо получить карту соответствия точек объектной и картинной плоскостей.

Объектная система координат построена на основе ее прообраза – системы координат на объектной плоскости, которая имеет начало координат в точке O'' , ось абсцисс $O''X''_{\max}$, ось ординат $O''Y''_{\max}$, ось аппликат направлена вниз, единицы измерения – мм. Для удобства за начало объектной системы координат возьмем объектив тепловизора, тогда объектная система координат может быть получена параллельным переносом системы прообраза на вектор $(0, -y_{\text{sev}}, -H_0)$. Проведем трассировку лучей. Для каждой точки $P_c(x', y')$ картинной плоскости C необходимо построить вектор $\vec{V}$ и найти пересечение прямой, на которой он лежит, с объектной плоскостью R в соответствующей точке $P_r(x'', y'')$ объектной плоскости R .

Входные параметры трассировки:

- X_0 – расстояние от точки пересечения оптической оси и объектной плоскости до края колошника вдоль продольного сечения, мм;
- $m \times n$ – разрешение тепловизора (ширина и высота картинной плоскости, пикс);
- Φ_h – угол обзора объектива (FOV по горизонтали);
- tangage – угол тангажа тепловизора относительно оси OX ;
- rysk – угол рысканья относительно оси OZ ;
- kren – угол крена относительно оси OY ;
- $x\text{Strafe}$ – смещение тепловизора по оси OX , мм;
- $y\text{Strafe}$ – смещение тепловизора по оси OY , мм;
- $h\text{Strafe}$ – смещение тепловизора по оси OZ , мм.

Входные переменные параметры трассировки:

- h_load – уровень засыпи (относительно нулевого уровня);
- D_h – диаметр шахты печи при уровне загрузки h , мм;
- pixMM – масштаб, отношение координат объектной плоскости к картинной плоскости.

Объектив характеризуется такими параметрами, как:

- диагональный угол обзора γ ;
- горизонтальный угол зрения β ;
- вертикальный угол обзора α .

Примем за нулевой уровень засыпи такой уровень (уровень колошника), при котором развертка, которая соответствует диагональному углу обзора γ , захватывает весь диаметр. Тогда расстояние от объектива до нулевого уровня назовем приведенной высотой.

Расчет приведенной высоты представлен формулой (2).

$$h0_{init} = \frac{(D(0) - X_0)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right) + \tan(\gamma)}. \quad (2)$$

Расчетный параметр objectiveH (3) необходим для вычисления максимальных углов радиус-вектора во взаимно-перпендикулярных плоскостях (4), (5):

$$\text{objectiveH} = \sqrt{\frac{\left(\frac{m}{2}\right)^2 + \left(\frac{n}{2}\right)^2}{\tan \frac{\text{objectiveAngle}}{2}}} \quad (2), \quad (3)$$

$$\alpha = \text{atan} \frac{n}{2 \times \text{objectiveH}}, \quad (4)$$

$$\beta = \text{atan} \frac{m}{2 \text{objectiveH}}. \quad (5)$$

Параметр y_sev (6) определяет смещение центра изображения (точки пересечения оптической оси с поверхностью засыпи) относительно центра колошника доменной печи.

$$y_sev = h0_{init} \times \tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right). \quad (6)$$

Тогда вектор смещения cam_{strafe} тепловизора будет рассчитан как (7), а вектор нормали поверхности $normal_{ground}$ как (8):

$$\overrightarrow{cam_strafe} = (0 + xStrafe, y_sev + yStrafe, 0 + hStrafe), \quad (7)$$

$$\overrightarrow{normal_ground} = (0, 0, h0_{init} + \overrightarrow{cam_strafe} \cdot \vec{Z}). \quad (8)$$

Пусть $\vec{V}$ – вектор, представляющий трассирующий луч. Тогда для вращения относительно осей координат по углам тангажа, крена и рысканья введено преобразование (9).

$$vr(\vec{V}, x, y, z) = \vec{Vo} \times M1 \times M2 \times M3, \quad (9)$$

где $M1, M2, M3$ – матрицы поворота аффинных преобразований, $\vec{Vo}$ – вектор $\vec{V}$ в однородных координатах. Однородные координаты вектора $\vec{V}(x, y, z)$ – это

$\vec{Vo}\left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}, w\right)$. Для исходного вектора положим $w = 1$. Для умножения вектора на

матрицу вектор в однородных координатах рассматривается как транспонированный к вектору столбцу. Вектор, полученный после матричного умножения, приводится к каноническому виду путем деления первых n координат на $(n + 1)$ -ю координату, в

рассматриваемом случае $n = 3$. Тогда если $\vec{V}(a, b, c, d)$ и $d \neq 0$, то $x = \frac{a}{d}$ $y = \frac{b}{d}$

$z = \frac{c}{d}$ итоговый вектор $\vec{V}(x, y, z)$.

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos x & -\sin x & 0 \\ 0 & \sin x & \cos x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$M2 = \begin{bmatrix} \cos y & 0 & -\sin y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin y & 0 & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M3 = \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z & 0 & 0 \\ \sin z & \cos z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тогда вектор нормали камеры $normal_{cam}$ будет рассчитан на основе вектора нормали поверхности засыпи (13):

$$\overline{normal_cam} = vr\left(\overline{normal_{ground}}, tangage, kren, rysk\right) \times \frac{normal_{ground}.Z}{normal_{cam}.Z}. \quad (13)$$

Аналогично рассчитываются вектора осей $\overline{OX_cam}$, $\overline{OY_cam}$ (14), (15):

$$\overline{OX_cam} = vr\left(\overline{(1,0,0)}, tangage, kren, rysk\right), \quad (14)$$

$$\overline{OY_cam} = vr\left(\overline{(0,1,0)}, tangage, kren, rysk\right). \quad (15)$$

Используя ранее полученные значения максимальных углов (4), (5), рассчитываются максимальные габариты картинной плоскости (16), (17).

$$maxX = |\overline{normal_cam}| * \tan \beta, \quad (16)$$

$$maxY = |\overline{normal_cam}| * \tan \alpha. \quad (17)$$

Для каждой точки исходного изображения строится трассирующий радиус-вектор $\overline{V_B}$, для которого необходимо найти координаты в объектной плоскости поверхности засыпи колошника.

$$\begin{aligned} \forall x'' \in [0, m), \forall y'' \in [0, n): \\ x_B = \left(x'' - \frac{m}{2}\right) * pixMM + cam_{strafe}.X \\ y_B = \left(-y'' + \frac{n}{2}\right) * pixMM + \left(\frac{D(h_{load})}{2} - cam_{strafe}.Y\right) \\ z_B = h0_{init} + cam_{strafe}.Z \\ \overline{V_B} = \overline{(x_B, y_B, z_B)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Пары точек картинной и объектной плоскостей лежат на общих трассирующих лучах, а значит, радиус вектор точки картинной плоскости будет представлен как $V_e = t * V_B$ (19):

$$\overline{V_e} = \overline{(x_e, y_e, z_e)} = t \times \overline{V_B}, \quad (19)$$

$$t = \frac{normal_{cam}.X^2 + normal_{cam}.Y^2 + normal_cam.Z^2}{normal_cam.X * x_B + normal_cam.Y * y_B + normal_cam.Z * z_B}. \quad (20)$$

Введем вспомогательные вектора $\overline{dotX}$ (21) и $\overline{dotY}$ (22):

$$\overrightarrow{dotX} = \overrightarrow{normal_cam} + tx_{\min} * \overrightarrow{OX_{cam}}$$

$$tx_{\min} = \frac{1}{|\overrightarrow{OX_{cam}}|^2} \left(\overrightarrow{OX_{cam}} \cdot X * (x_e - normal_{cam} \cdot X) + \right. \\ \left. + \overrightarrow{OX_{cam}} \cdot Y * (y_e - normal_{cam} \cdot Y) + \overrightarrow{OX_{cam}} \cdot Z * (z_e - normal_{cam} \cdot Z) \right) \quad (21)$$

$$\overrightarrow{dotY} = \overrightarrow{normal_cam} + ty_{\min} * \overrightarrow{OY_{cam}}$$

$$ty_{\min} = \frac{1}{|\overrightarrow{OY_{cam}}|^2} \left(\overrightarrow{OY_{cam}} \cdot X * (x_e - normal_{cam} \cdot X) + \right. \\ \left. + \overrightarrow{OY_{cam}} \cdot Y * (y_e - normal_{cam} \cdot Y) + \overrightarrow{OY_{cam}} \cdot Z * (z_e - normal_{cam} \cdot Z) \right) \quad (22)$$

тогда искомые координаты в объектном пространстве (x^* , y^*) могут быть представлены как длины векторной разницы (23), (24):

$$x^* = |\overrightarrow{dotX} - \overrightarrow{normal_{cam}}| \times sign(tx_{\min}), \quad (23)$$

$$y^* = |\overrightarrow{dotY} - \overrightarrow{normal_cam}| \times sign(ty_{\min}). \quad (24)$$

Для удобства отображения представим искомую точку в пространстве картинных координат тепловизионного изображения (25), (26):

$$x' = round\left(\frac{x_{coord} \times m}{2 \times maxX}\right), \quad (25)$$

$$y' = round\left(\frac{y_{coord} \times n}{-2 \times maxY}\right). \quad (26)$$

Отображение $rm(x'', y'')$ будет определено только на области точек, ограниченной окружностью радиуса колошника, причем каждой из них будет соответствовать точка, полученная пересечением трассировочного луча (27):

$$rm(x, y) = \begin{cases} \text{не определено, } x^2 + y^2 > \left(\frac{D(h_load)}{2}\right)^2 \\ \{x'; y'\}, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (27)$$

Таким образом, может быть рассчитано соответствие для каждой точки $P_r(x'', y'')$ объектной плоскости будет вычислена точка $P_c(x', y')$ картинной плоскости. На практике используется обратное соответствие (каждой точке на изображении находится точка на поверхности засыпи шихты), что может быть легко получено на основе рассчитанной таблицы операцией замены ключей и значений таблицы.

Выводы

Полученная геометрическая модель учитывает как стационарные параметры расположения тепловизора под куполом печи и поле зрения его объектива, так и динамически изменяющееся расстояние от тепловизора до поверхности засыпи шихты, и функционально изменяющийся диаметр шахты. Тестирование модели на точность

решения проводилось с целью определения отклонений фактических параметров трассировки от расчетных для внесения корректировок и выявило отклонения размеров истинных диаметров и рассчитанных на основе модели в среднем 1,76 %. Таким образом, полученная модель обладает достаточной точностью для определения размеров и площадей, однородно нагретых зон на тепловизионном изображении.

Литература

1. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия Чугуна*. Киев: Выща школа, 1988.
2. ЗАО "Научно-производственный и коммерческий центр «Тотем»" Роторный распределитель шихты // Патент Российской Федерации RU 2302594. Москва 2007.
3. Лаврухин А.И., Селяничев О.Л. Истинные размеры объектов на цифровых тепловизионных изображениях // Череповецкие научные чтения – 2015: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Череповец, 2016. Ч. 3. С. 97–98.
4. Лаврухин А.И., Хинский Л.Д. Автоматизированная система тепловизионного контроля состояния распределительного лотка БЗУ и температуры поверхности уровня засыпи шихты на колошнике ДП № 5 Череповецкого ПАО «Северсталь» // *Черная металлургия*. 2016. Вып. 4 (1396). С. 35–37.
5. Михайлова А.П., Чибуничева А.Г. Курс лекций по фотограмметрии. М., 2011.
6. Шепетовский И.Э. Домна и век «хай-тек» // *Металлы Евразии*. 2008. № 2.

References

1. Efimenko G., Gimmeфарb A.A., Levchenko B.E. *Metallurgiiа chuguna* [Ironmaking]. Kiev, 1988.
2. ЗАО "Nauchno-proizvodstvennyi i kommercheskii tsentr "Totem" [JSC "Scientific-Production and commercial center "Totem"] Rotornyi raspredelitel' shikhty [rotary batch distributor]. Patent Rossiiskoi Federatsii RU 2302594 [Patent of Russian Federation RU 2302594]. Moscow 2007.
3. Lavrukhin A.I., Selyanichev O.L. Istinnye razmery ob"ektov na tsifrovyykh teplovizionnykh izobrazheniiakh [The true size of objects on digital thermal imaging]. *Cherepovetskie nauchnye chteniia – 2015: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Ch. 3* [Cherepovets Scientific Readings – 2015: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference Part 3]. Cherepovets, 2016, pp. 97–98.
4. Lavrukhin A.I., Khinsky L.D. Avtomatizirovannaia sistema teplovizionnogo kontrolya sostoiannia raspredelitel'nogo lotka BZU i temperatury poverkhnosti urovnia zasypi shikhty na koloshnike DP № 5 Cherepovetskogo PAO "Severstal" [Automated system for thermal control of the state of the distribution tray BLT and the level of the surface temperature of the grist of the charge on the throat of the DP number 5 PJSC of the Cherepovets "Severstal"]. *Chernaia metallurgiiа* [Ferrous metallurgy], 2016, no. 4 (1396), pp. 35–37.
5. Mikhailova A.P., Chibunicheva A.G. *Kurs leksii po fotogrammetrii* [The course of lectures on photogrammetry]. Moscow, 2011.
6. Shepetovskii I.E. Domna i vek «khay-tek» [Domna and the age of "high-tech"]. *Metally Evrazii* [Eurasian Metals], 2008, no. 2.

Лаврухин А.И., Селяничев О.Л. Геометрическая модель тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты доменной печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №1. С. 48–55.

For citation: Lavrukhin A.I., Selyanichev O.L. The geometrical model thermovision image of raw materials' surface charged into the blast furnace. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 1, pp. 48–55.