

**NONLINEAR VIBRATIONS OF PROFILE PRESS
MANDREL OF TUBE-PRESS MACHINE**

Анотація. Вирішена задача про нелінійні коливання технологічного інструмента в процесі пресування труб. Встановлені динамічні переміщення різних точок голки в умовах неперервного обтікання потоком метала для обраного спектра параметрів процесу пресування.

The processes of extrusion at different technological schemes of tube production, alongside with positive aspects, have some characteristic disadvantages which limits the area of their usage.

Among them, mainly, high variations in wall thickness of obtained shells are shown, caused by vibrations of basic technological tool (mandrel) in deformation zone and outside of it, specified by characteristic dynamic conditions of slip flow by metal. Formation of non-stable deformation zone, mainly, caused by imperfection both of extrusion conditions and by main parameters of deformation zone.

Elimination of pointed disadvantages is possible by choosing of optimal parameters of vibration system which provide rational conditions of extrusion process of tubes [1,2].

Finding of concrete recommendations according to choosing of optimal parameters of tube extrusion process stipulated by technological modes, in the conditions of functioning of mechanic system in some non traditional statement, mainly, connected with forming of demanded dynamic model of the problem stated.

Consider some the most characteristic moments of technological process of extrusion of tubes. The process of tubes extrusion, at the most of horizontal presses, is performed by the following way: preliminary heated tube billet (shell) 6 enters into the container 3, which have the temperature 380-420 °C. Mandrel 4 is forcibly entered into the tube shell 6 by hydraulic actuator of press. Then press ram 1 with pressure disk 2 press tightly billet 6 into the container.

Mandrel 4, at the same time, takes the place in annular gap of die 5, with some projection along axis of piercing. Therefore, at further movement of press ram 1, in limited volume of container 3, metal is pressed out into gap between mandrel 4 and die 5 is being formed to the tube 6 of given geometrical sizes [3,4,5]. It is necessary to take into consideration, that at realization of some pressing conditions, the process of slip flow of mandrel by metal is accompanied by large dynamic loads at technological tools. It stipulates considerable vibrations of mandrel in deformation zone, and as a result, high nonuniform pipe wall thickness (fig.1).

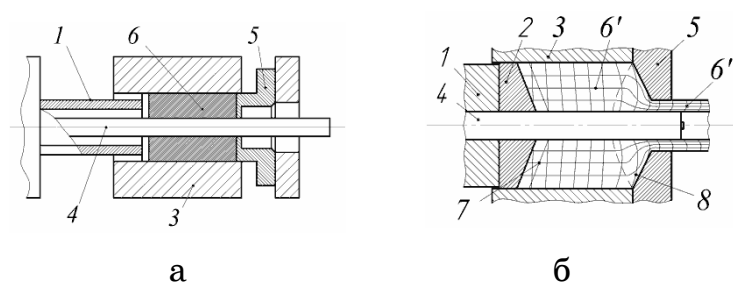


Figure 1– Diagram and process of extrusion of tube:

1 – press ram, 2 – pressure disk, 3 – container, 4 – mandrel,
5 – die, 6 – tube billet, 7 – remainder of billet 8 – lubricant plate

Consider dynamic processes of slip flow of mandrel by stream flow of hot metal and conditioned its nonlinear vibrations, on the basis of offered loading diagram at the figure 2.

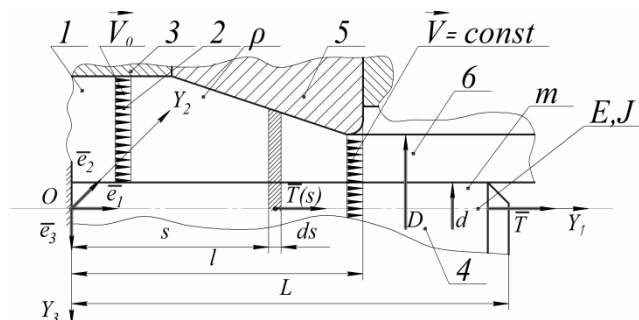


Figure 2 – Loading diagram to nonlinear vibrations of needle (mandrel)

at tube extrusion: 1 – press ram; 2 –shell; 3 – container;
4 – needle (mandrel); 5 – die; 6 – tube

For research of vibration processes in deformation zone and dynamic of cantileverly fixed mandrel in nonlinear statement, consider its movements in uniform slip flow of metal being pressed.

It is necessary to note that for accepted quasi-stationary process of tube extrusion ($\vec{V}=\text{const}$) and loading diagram of nonlinear dynamic model according to [6, 7], differential equation of movement of mandrel in vector form is as follows:

$$\begin{aligned}
 m \frac{\partial^2 \vec{R}}{\partial t^2} + M \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \times \left\{ \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_\tau \frac{\partial}{\partial s} \right)^2 \vec{R} \right] \times \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right\} = \\
 = W \vec{e}_3 + \frac{\partial}{\partial s} \left(T \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right) + EI \frac{\partial}{\partial s} \left\{ \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \times \left[\frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \times \frac{\partial^3 \vec{R}}{\partial s^3} \right] \right\} + \vec{f}_v + \\
 + \frac{K_n \rho d}{2} \left| \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \times \left[\left(\vec{V} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right] \right| \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \times \left[\left(\vec{V} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right] + \\
 + \frac{\pi K_f \rho d}{2} \left| \vec{V} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \right| \left(\vec{V} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$V_\tau = \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \left(\vec{V} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \right); \quad \left(\frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right)^2 \approx 1 \tag{2}$$

Here t – time; s – present-position coordinate of mandrel; $\vec{R} \equiv (Y_1; Y_2; Y_3)$ – radius vector of chosen coordinates of the system; T – tension of mandrel in Y_1 -direction; ρ – density of pressed metal; m – linear mass of mandrel; M – added mass of metal flow; $\vec{W}$ – lifting force, acting on unit of length of mandrel; d – mandrel diameter; K_n – effective coefficient of resistance of mandrel (shape); K_f – sliding friction factor of metal at mandrel; E – coefficient of elasticity of mandrel material; I – moment of inertia of mandrel; $\vec{e}_3$ – unit vector along direction of gravity force; $\vec{f}_v$ – distributed force, conditioned by flow separation of metal from surface of mandrel in the process of tube extrusion.

Inertial forces of added mass of pressed metal can be presented as particular generalizations of analytical expressions, pointed in [6, 7, 8]. Formula for elastic forces has been obtained taking into account geometrical nonlinearity of stem deformation of mandrel. At the same time, inertial summands in equation have been neglected according to conditions given in this research paper [6]. In this statement of problem of dynamic model it has been taken into account that the moment of elastic

force of mandrel is proportional to its curvature and is directed at binormal to its elastic line. It is necessary to note that concretization of formula for force $\vec{f}_v$ in each separate case will be lead in accordance with [7]. Though lifting force acting on mandrel is relatively small and flow of metal, in pursuance of requirements of technological process, is directed strictly along axis of extrusion Y_1

$$\vec{V} = V_0 \vec{e}_1 \quad (3)$$

Here $\vec{e}_1$ is unit vector along axis Y_1 . Obviously, that mandrel in position of equilibrium is located along axis of extrusion Y_1 . Take into account that under limited deformations of mandrel at exit from equilibrium the angles of gradient of its axis to axis Y_1 remains small

$$\vec{R} \cong s \vec{e}_1 + y \vec{e}_3, \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 \ll 1 \quad (4)$$

Taking into account correlation (3) and (4), further it will be supposed, that in this problem statement, can neglect the force that stipulated breakaway of metal flow from surface of mandrel. Therefore, substituting formula (4) for $\vec{R}$ into equation (2), can be convinced that at neglecting of dimensions, which are quadratic to angle between axis of mandrel and axis of extrusion Y_1 , it satisfies to this equation. Substitute formula (3) and (4) to the first component of equation (1). Neglecting values, quadratic to shift of mandrel stem along axis Y_1 , after making appropriate operation of integration, have the following:

$$T = T_* - q_f(L - s), \quad q_f = \frac{\pi K_f \rho d V_0^2}{2} \quad (5)$$

Here T_* is tension at the end of technological tool (at $L = s$).

Put correlation (3), (4) and (5) to the equation (1). Therefore, neglect the summands in obtained expression, by summands which are quadratic to the displacement of mandrel Y_1 -direction, except summands which is proportional to coefficient of mandrel shape K_n , taking into account, that the latest one is large in comparison with coefficient of friction of metal on mandrel. In the result of necessary substitutions and some conversions for y get the following differential equation:

$$\begin{aligned}
& m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + M \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right)^2 y + q_f \frac{1}{V_0} \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial s} \left\{ [T_* - q_f(L-s)] \frac{\partial y}{\partial s} \right\} + \\
& EI \frac{\partial^4 y}{\partial s^2} + q_n \frac{1}{V_0^2} \left| \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right) y \right| \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right) y = 0, \\
& q_n \equiv \frac{K_n d \rho V_0^2}{2}
\end{aligned} \tag{6}$$

Compare differential equation (6) with equation (5) of the [8] for case of relatively low amplitudes of mandrel vibrations, when can neglect ($q_n=0$) particular nonlinear summunds in equation (6). If suppose that $C_n = C_T$ in equation (5) of the [8], and make then the following substitution

$$x \rightarrow s; u \rightarrow V_0; \frac{C_T M}{2D} \rightarrow q_f; \frac{C_n M u^2}{2} \rightarrow T_* \tag{7}$$

in the result obtaint the following differential substitution:

$$\begin{aligned}
& m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + M \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right)^2 y + q_f \frac{1}{V_0} \frac{\partial y}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right) y - \\
& - \frac{\partial}{\partial s} \left\{ [T_* - q_f(L-s)] \frac{\partial y}{\partial s} \right\} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial s^2} = 0
\end{aligned} \tag{8}$$

Comparing the expressions (8) and (6) at $q_n=0$ see that they do not coincide. It can be explained by that the equilibrium equations of streamline body (stem) in transverse direction equated not correctly. Note that in equation (1) of the [8] value F_n there is projection of distributed force to resistance slip flow on normal to axis of stem, at the time when other summunds of equation of equilibrium correspond projections of appropriate forces on axis Y_1 .

Incorrectness of close origin is in mathematical model (equation of dynamic equilibrium) of vibration of stem in slip flow of working medium ([6], equation 16). It relates to such circumstance that friction resistance in slip flow of metal was included in deformation force of elastic line axis of stem and was not included in tensile force (tensile force of stem is accepted as constant).

For accepted dynamic model of extrusion process consider some characteristic boundary conditions of the problem under study of nonlinear vibrations of mandrel. On the basis of conditions of realization of stable technological extrusion process, shift and orientation of

mandrel in point of mounting to the body of press must be given in the problem [2, 5] in the following form:

$$y|_{s=0} = f(t); \quad \frac{\partial y}{\partial s}|_{s=0} = \alpha(t). \quad (9)$$

Here $f(t)$ and $\alpha(t)$ – proper time functions which are given in conditions of realization of the extrusion process.

Let place of mounting of mandrel to the body of mandrel holder of press remains perpendicular to axis Y_1 . Therefore, on the basis of equilibrium condition of forces made to mandrel, make factorization for shifting of its relative sections along axis Y_1 . In the result in zero and first approximization for shifting of mandrel obtain the following:

$$T_* = \frac{K_* S_* \rho V_0^2}{2}; \quad (10)$$

$$\left[M_* \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{T_*}{V_0} \left(\frac{\partial y}{\partial t} + V_0 \frac{\partial y}{\partial s} \right) - EI \frac{\partial^3 y}{\partial s^3} - Q_* \right] \Big|_{s=L} = 0. \quad (11)$$

Here M_* – mass of stem with mandrel; K_* – effective coefficient resistance of mandrel; S_* – area of front part of mandrel; Q_* – force, applied to mandrel from the side of pressed. Force Q_* can be conditioned, for example, by movement of metal along surface of mandrel. If end of mandrel in the extrusion process is free, then according to [6; 8] obtain necessary and enough condition

$$\left[EI \frac{\partial^3 y}{\partial s^3} + f_2 M V_0 \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial s} \right) y - (m + f_2 M) \Delta L \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right] \Big|_{s=L} = 0, \quad (12)$$

$$\Delta L = \int_{L-\ell}^L S(s) ds, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} \Big|_{s=L} = 0, \quad EI \rightarrow 0$$

Here ℓ – length of mandrel at the sector between die and mounting to the body of mandrel holder; S – area of cross-section of main part of mandrel; $S(s)$ – current area of cross-section of mandrel; f_2 – dimensionless parameters of problem $f_2 \leq 1$.

Consider that bending moment at the end of mandrel equals to zero, write the condition $\frac{\partial^2 y}{\partial s^2} \Big|_{s=L} = 0$. Obviously, that this condition and condition (9) can be neglected, if suppose that mandrel in slip flow of metal is flexible enough.

As boundary conditions of problem accept first demanded condition (9) and necessary and enough condition (12), using

$$f(t) = y_0 \cos(\Omega_0 t), Q_* = G_* \sin(\Omega_* t) \quad (13)$$

As initial conditions of the problem we accept

$$y|_{t=0} = y_0 \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right), \frac{\partial y}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (14)$$

In correlations (13) and (14) dimensions $y_0, \Omega_0, G_*, \Omega_*$ are definite constants, physical meaning of which is obvious from basic conditions of realization of extrusion process.

For convenient imagination and analysis of the problem, supply some non-dimensional parameters of the system

$$\begin{aligned} \eta &\equiv \frac{y}{d}, \sigma \equiv \frac{s}{L}, \tau \equiv \frac{V_0 t}{L}, \gamma_* \equiv \frac{2K_* S_*}{\pi d^2}, \\ \gamma_f &\equiv \frac{2K_f L}{d}, \gamma_n \equiv \frac{2K_n}{\pi}, \eta_0 \equiv \frac{y_0}{d}, \nu_* \equiv \frac{\Omega_* L}{V_0}, \\ \mu_* &\equiv \frac{M_*}{ML}, \chi_* \equiv \frac{G_* L}{dMV_0^2}, \nu_* \equiv \frac{\Omega_* L}{V_0} \end{aligned} \quad (15)$$

In the result, differential equation (6), and also accepted initial and boundary conditions of the problem imagine in the following form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} + \left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \right)^2 \eta + \gamma_f \frac{\partial \eta}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left\{ (\gamma_* + \gamma_f (1 - \sigma)) \frac{\partial \eta}{\partial \sigma} \right\} + \\ + \gamma_n \left[\left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \eta \right] \left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \eta = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\eta \Big|_{\sigma=0} = \eta_0 \cos(\nu_* \tau); \left[\mu_* \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} + \gamma_* \left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \eta \right] \Big|_{\sigma=1} = \chi_* \sin(\nu_* \tau) \quad (17)$$

$$\eta \Big|_{\tau=0} = \eta_0 \cos\left(\frac{\pi \sigma}{2}\right); \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (18)$$

To solve differential equation (16) with chosen boundary and initial conditions (17) and (18) apply method of finite differences according [8] with further use of modern computer technologies. Hence, in order to receive reliable pattern of dynamic processes and spectrum of nonlinear vibrations of mandrel, modify non-dimensional parameters of the system within the bounds, stipulated by technological process of tube extrusion.

Behavior of mathematical model of nonlinear vibrations of mandrel in slip flow of metal, in the extrusion process, has been checked by

breaking of computational mesh at further iterations for chosen method of finite differences. Numerical solution of the problem allows to determine instantaneous configurations of lines of mandrel axis and also time dependences (dynamic predictions) of its different sections. Analysis of dependencies of dynamic shifts of different image points of mandrel in time shows distinctly interaction of disturbances attached to mandrel in the process of tubes extrusion. External disturbances of mandrel are caused by given periodical shift of basic point of mandrel and periodic force attached to the end of mandrel mounting. This interaction appears in form of mutual modulating of vibration amplitudes of dynamic model of mechanical system under consideration.

Character of dynamic state of mandrel, in established mode of vibrations of system is determined by change on its working length of disturbances amplitudes y_0 and frequencies which correspond to shifts of basic and end points of technological tool (mandrel) in the conditions of flow of stream of metal in the process of extrusion. Attenuation of disturbances caused by periodical shifts of basic point of mandrel and point of mandrel mounting in the direction of metal flow, is to be weaker in comparison with values of disturbances caused by periodical force attached to the end of technological tool in opposite direction. Increase of ratio (V_0/L) leads to decrease of attenuation of disturbances of technological tool caused by periodic disturbances (shifts) of basic point of mandrel in the direction of movement of metal flow. At the same time, conditions, in opposite direction caused by force applied to end part of mandrel mounting to body of holder by periodical force, promote stronger suppression of disturbances of the system.

Dependencies of dynamic shifts of different points in time, in the mode of established vibrations of mandrel for selected spektrum of dimensionless parameters, taking into account the most characteristic mode of extrusion process are indicated at the figure 3 and 4.

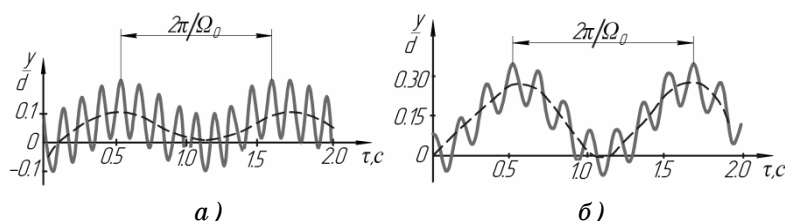


Figure 3 – Dynamic of mandrel of horizontal hydraulic profile 31,5 MH at extrusion of stainless steel tubes 12X18H10T, diameter 168Ч14: а – pressing speed $V_0 = 0,2$ m/s; б – pressing speed $V_0 = 0,35$ m/s

Transient processes of forming of nonlinear vibrations of mandrel at the figure 3 have not been shown. Average values of amplitudes of nonlinear mandrel vibrations ($2\pi/\Omega_0$) on periodic time in the extrusion process are indicated by a dotted line. Note that for curve line (figure. 3, a) ratio y_0/d twice time more than for curve line (figure 3, б).

Some peculiarities of decay of mandrel vibrations in the extrusion process and changing on length of mandrel of amplitude of disturbances y_0 , are indicated at the figure 4.

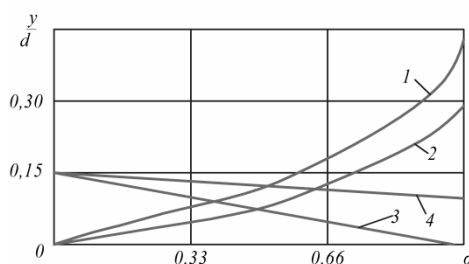


Figure 4 – Attenuation of vibrations on length of mandrel stem in the process of tube extrusion:

- 1, 2 – caused by vibrations of mandrel stem end;
- 3, 4 – caused by vibrations of basic point of mandrel stem

Note that nonstable dynamic processes are caused by periodic shifts of basic point and periodic force applied to mandrel. It is typical exceptionally for particular parameters of the system and for wide distributed modes of tube extrusion.

Results of industrial test of horizontal hydraulic press of tube-press machine 31,5 MH in conditions of realization of rational technological process, for example, during extrusion of seamless tubes of diameter 168x14 from stainless steel 12X18H10T, confirms appropriateness of theoretical hypotheses and adequacy of chosen mathematical model. At the same time, with help of selecting of rational modes of tubes extrusion and of selection of dynamic characteristics of the system, considerable increase of quality of produces seamless tubes (reduction of lengthwise and crosswise nonuniform shell wall thickness equals to approximately 12 %) has been achieved. Reliability of achieved results and correctness of functioning of the system at nonlinear mandrel vibrations has been checked with help of test calculations for cases when solving of the problem in analytical kind for elementary model of mechanic system is known. [9].

CONCLUSIONS

1. Differential equation of nonlinear vibrations of mandrel in uniform slip flow of metal for accepted loading diagram and dynamic model of quasistationary process of tubes extrusion has been obtained.

2. Decision of differential equation of nonlinear vibrations of mandrel, with chosen boundary and initial conditions by method of finite differences with usage of modern computer technologies, has been offered.

3. With help of numerical analysis of mathematical model of nonlinear vibrations of mandrel in the process of tube extrusion, instant configurations of its elastic line axis and also time dependence (dynamic predictions) of its different sections have been determined.

4. Amplitudes of disturbances on length of mandrel caused by periodic shifts of basic point, and applied to the mandrel forces have been determined taking into account particular parameters of dynamic system and modes of tubes extrusion.

5. It has been found that increase ratio of extrusion speed to length of mandrel resulted in decrease of attenuation of mandrel disturbance caused by periodic disturbances (shifts) of basic point in the direction of metal flow and stronger attenuation of disturbances caused by periodic force attached to end part of mandrel mounting.

REFERENCES

1. Danilov F.A. Gleyberg A.Z., Balakin V.G. Hot rolling and extrusion of tubes. – M.: Metallurgiya Publishers, 1972. 576 p .
2. Medvedev M.I., Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A. Improvement of the process of tube extrusion. - M.: Metallurgiya Publishers, 1986. 151 p
3. Perlin I.L. The theory of extrusion of metals. M.: Metallurgiya Publishers, 1964. 344 p .
4. Gulyaev G.I., Pritomanov A.E., Drobich O.P. and others. Extrusion of steel tubes and profiles. M.: Metallurgiya Publishers, 1973. 192 p .
5. Danchenko V.N. Technology of tube production. Textbook for IHE./ Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romancev B.A., Samusev S.V. – M.: Internet – Engineering. 2002. - 640 p.
6. Logvinovich G.V. Hydrodynamics of flows with free boundaries. – Kiev.:Naukova dumka. 1969. 370 p.
7. Gurvich A.A., Efremova N.S., Saltanov N.V. Nonlinear variations of strand in coaxial flow of liquid. – PMM, 1975. pp.29-33.
8. Valdenssis M.P. J.Fi.Mech., 1968, 34,2. pp. 14-18.
9. Reychtmayer R., Morton K. Different methods of solving of boundary problems. – M.: Myr.1972.540p.
10. Kolikov A.P., Poluhin P.I., Krupin A.V. New processes of deformation of metals and alloys. – M.: Vischaya skola, 1986. 351 p.

В.Н. Журавлев, С.А. Борзов, А.В. Попчёнков, В.С. Кабак

**ЧАСТОТНАЯ МОДЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАМЕНИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД**

Анотація. Запропонована і експериментально досліджена частотна модель сигналу турбулентного горіння, яка визначає енергію турбулентного потоку в камері згорання. Модель чутлива до параметра потужності сигналу пульсацій турбулентної швидкості на інтервалі часу активності полум'я в об'ємі жарової труби і параметрів вібраційного горіння в діапазоні вірогідних частот.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [1 – 3] доказывают, что наиболее эффективным, с точки зрения энергетической эффективности сгорания топлива и токсичности продуктов сгорания, является режим турбулентного горения. Косвенными параметрами, характеризующими эффективность режима, являются температура пламени и количество эмиссии окислов азота NO_x , причём, при уменьшении этих параметров пламени имеют предрасположенность к режиму вибрационного горения [4]. Предложены феноменологические параметры турбулентности потока рабочего тела камер сгорания. Однако технологическая трудоёмкость их определения в составе двигателя и адаптация к конструктивным особенностям узла камеры сгорания не позволяют осуществлять оперативный прогноз эффективности управление режимом горения в режиме реального времени.

Научно-техническая задача разработки и исследования математических моделей, чувствительных к параметру энергетического качества режима турбулентного горения, с учётом границ перехода в вибрационный режим, актуальна как с теоретической точки зрения, так и с прикладной, в части разработки опережающего научно-технического задела создания перспективных ГТД.

1 Основная часть. Теоретические исследования. Первый вклад в изучение *интенсивности* турбулентных пламен был сделан известным немецким химиком Дамкёлером [2]. Он предположил, что тур-

булентное пламя имеет ту же структуру, что и ламинарное и связал наблюдаемое увеличение скорости горения с вызываемым турбулентностью искривлением фронта пламени, что увеличивает площадь поверхности горения по сравнению с гладким ламинарным фронтом и, следовательно, способность «перерабатывать» свежую смесь. Автор предложил характеризовать скорость распространения турбулентного пламени при крупномасштабной турбулентности следующим выражением $S_T = S_L + u'$, [м/с], где S_T – скорость распространения турбулентного потока, S_L – распространения ламинарного потока, u' – среднеквадратическое значение пульсаций скорости. Параметр турбулентности (1) имеет размерность скорости и не позволяет пояснить масштаб, т.е. часть энергии турбулентности в суммарной энергии потока рабочего тела, в связи с этим он не нашел применения в процессах технологической доводки двигателей.

В дальнейшем появился ряд теорий, исследующих концепцию искривленного фронта пламени и отличающихся от теории Дамкёлера (и одна от другой) главным образом способом увязывания характеристик турбулентности с результирующим увеличением поверхности пламени. Так, в подходе, развитом Щёлкиным [5], выражение для параметра скорости U_T турбулентного определяется выражением:

$$U_T = U_N \cdot \sqrt{1 + \frac{u' \cdot l}{\chi}}, \text{ [м/с]}, \text{ где } u' - \text{средняя скорость турбулентных}$$

пульсаций [м/с], l – масштаб турбулентности [м], χ – температуропроводность [м²/с]. Анализ показывает, что данный подход имеет недостатки, свойственные предыдущему, однако учитывает линейный масштаб турбулентности l , который должен соответствовать размеру жаровой трубы и коэффициент температуропроводности χ , который, по мнению автора, отражает скорость перемещения энергии. Отличия от предыдущих подходов существенно повышают энергетическую информативность параметра (2), однако он не поясняет границы перехода к вибрационному процессу горения.

Наибольшее применение в научных и технических исследованиях нашел безразмерный параметр Кармана [6], который определяется отношением среднего квадратичного пульсационных составляющих компонент скорости потока рабочего тела u' к осреднённой на определённом интервале времени T скорости его течения $\bar{U}$:

$$Ka(t) = \frac{u'(t)}{\overline{U(t)}}, \quad (1)$$

$$T \in [t]$$

Анализ параметра (1) показывает его информативность в части масштаба скоростей, однако он не отражает параметр линейного масштаба энергии турбулентности l и не несёт информации о признаках вибрационного горения. Следует отметить, что не все исследования достаточно хорошо согласуются между собой из-за сложности их проведения, различия методик измерений и точности измерительных приборов [5].

Как видно из анализа (1 – 3), пульсационная составляющая турбулентной скорости горения $u'(t)$ неизменно участвует во всех выражениях для определения параметра турбулентности, но существующие подходы не позволяют адекватно отвечать на возникающие вопросы о качестве процесса горения. Проведя анализ традиционных одномерных параметров турбулентности пламён можно сделать вывод, что все они слабо чувствительны к двум очень важным, по нашему мнению, параметрам: энергетической эффективности турбулентности и границе начала вибрационного горения.

В процессе решения поставленной задачи предложена и апробирована математическая модель j -ого параметра турбулентности $K_{t\omega}$, которая определяется выражением:

$$K_{t\omega_j} = 10 \lg \left[\frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_i(\omega_i, t)}{S_0(\omega, t)} \right], [dB]$$

$$S_i(\omega_i, t) \geq a \{ \max[S(\omega, t)] \}, \quad (2)$$

$$S(\omega, t) = \int_0^T R_{xx}[u'(t)] e^{-j\omega t} dt,$$

$$\omega \in [\Delta\Omega], t \in [T]$$

где: $\max[S(\omega, t)]$ – максимальное значение спектральной плотности мощности $S(\omega, t)$ сигнала $u'(t)$ в полосе частот $\Delta\Omega$ при $t = T$; $S_0(\omega, t) = 1W / Hz$ – константа пороговой спектральной плотности мощности сигнала $u'(t)$; $R_{xx}[u'(t)]$ – автокорреляционная функция сигнала

$u'(t)$; $a = 0,1$ – коэффициент чувствительности модели (динамический диапазон $20dB$); T – интервал времени анализа; $k = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega}$ – количество интервалов частот $\Delta\omega = 1Hz$ в частотном диапазоне $\Delta\Omega$.

Предложенный параметр (2) чувствителен к спектральной плотности мощности (энергии) сигнала пульсаций турбулентной скорости $u'(t)$ на интервале времени T и параметрам вибрационного горения в полосе частот $\Delta\Omega$. Параметр является аналогом понятия объема канала, который традиционно [7] применяется в теории информации.

2 Результаты экспериментальных исследований. Результаты получены в процессе выполнения научно-исследовательских работ на испытательных стендах ГП «Ивченко-Прогресс» и АО «Мотор Сич», Украина г. Запорожье. В настоящее время на ГП «Ивченко-Прогресс» разрабатывается и проходит практическую апробацию методика обнаружения процесса вибрационного горения в камере сгорания ГТД с помощью пьезоэлектрического акселерометра [8], который устанавливается возле рабочей форсунки камеры сгорания.

Был проведён расчет спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала $u'(t)$ датчика вибраций в широкой полосе частот (100 – 1500) Гц (рис. 1).

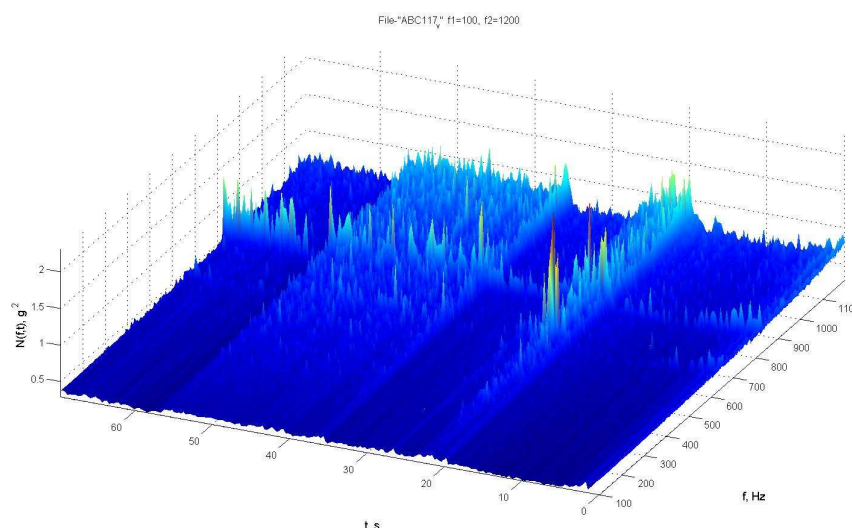


Рисунок 1 - Функция СПМ сигнала датчика вибраций

Анализ функции СПМ показывает наличие «следов» роторных вибраций вала свободной турбины $f = 640Hz$ и вала турбокомпрессора

$f \approx 830\text{Hz}$. Исключив эти диапазоны частот, были рассчитаны (рис. 2) функции параметра Кармана (1) и спектрального параметра турбулентности (2).

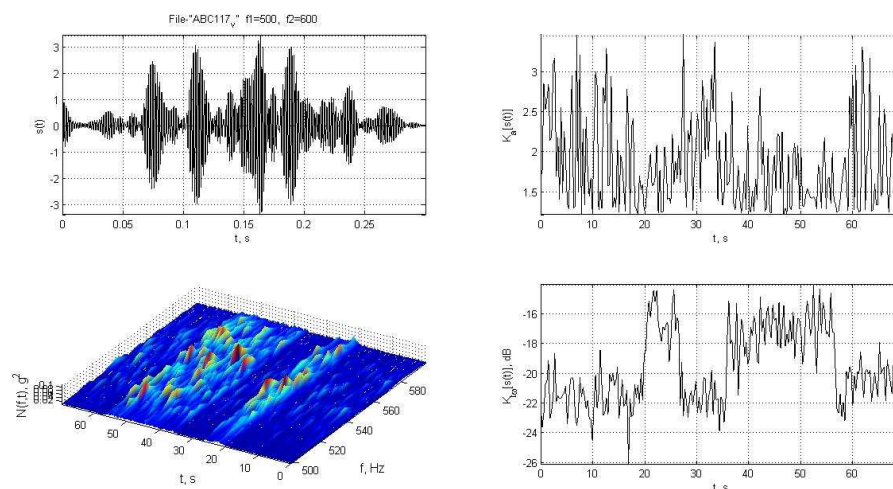


Рисунок 2 - Графики функций в частотном диапазоне $f = (500 - 600)\text{Hz}$

На рисунке приведены: левый верхний – анализируемый сигнал $u'(t)$, после полосовой фильтрации фильтром Баттерворта второго порядка и обработки Гауссовым окном для устранения эффекта Гиббса; левый нижний – СПМ $S(\omega, t)$ анализируемого сигнала; правый верхний – функция параметра Кармана $Ka(t)$; правый нижний – функция спектрального параметра турбулентности $K_{t\omega}(t)$.

3 Анализ результатов. Выводы. Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- функция спектрального параметра турбулентности в анализируемом частотном диапазоне показывает, что она имеет иной характер огибающей (с учетом изменения режима двигателя на (15 - 20)с.) по сравнению с частотными диапазонами, не содержащими признаков вибрационного горения;
- параметр Кармана (1) слабо чувствителен к параметру пульсаций турбулентного горения, который отчетливо наблюдается на функциях СПМ;
- предложенный спектральный параметр турбулентности (4) адекватно отображает турбулентные процессы на интервалах времени (20 – 25) с. и (40 – 55) с.

Для «тонкой» доводки узла камеры сгорания ГТД необходимо более полное определение выделенной энергии при однозначной взаимосвязи с частотным диапазоном турбулентных процессов и режимом работы двигателя. Исследованный спектральный параметр сигнала турбулентного горения однозначно определяет вышеозначенное взаимодействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение [Текст] / Б.В. Раушенбах – М.: Гос. изд-во физ. мат. лит., 1961. – 500 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах ГТД. [Текст] / Пер с англ. М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.М. Пчелкин М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Open-loop active control of combustion dynamics on gas turbine engine. Geo. A. Richards, Jimmy D. Thornton, Edward H. Robey, Leonell Arellano. [Текст] / Journal of engineering for gas turbines and power. Vol. 129 January 2007.
5. Щелкин К. И. - Быстрое горение и спиновая детонация газов. [Текст]/ Под. ред. Академика Н.Н. Семенова. – М.: Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР. 1949. – 196 с.
6. Carl W. Hall Laws and Models: Science, Engineering and Technology. [Электронный ресурс]
<http://books.google.ru/books?id=EEhpsf6L09gC&lpg=PA241&dq=kaman%20number&pg=PA241#v=onepage&q=karman%20number&f=false> /CRC Press, Boca Raton, 2000, 524 p.
7. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования [Текст] / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.
8. Кравченко И.Ф., Журавлев В.Н., Борзов С.А. Исследование влияния параметров пульсаций давления в камере сгорания на устойчивость работы ГТД. [Текст] / Авиационно-космическая техника и технология №8 (105) стр. 136-141

Н.С. Прядко, Г.М. Саксонов, Е.В. Терновая

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В данной работе предложена модель замкнутого цикла измельчения, основанная на основе дискретно-событийном подходе моделирования стохастических динамических процессов. Разработанный программный комплекс протестирован на результатах струйного измельчения шлаков.

Ключевые слова: замкнутый цикл, измельчение, фракционный состав, имитационная модель.

Введение. В технологии измельчения минерального сырья для снижения энергоемкости процесса последнее время широко используются замкнутые циклы. Суть замкнутого цикла измельчения заключается в том, что из мельницы за счет движения транспортирующей среды (вода, воздух) извлекают заведомо недоизмельченный материал, который во внешнем классификаторе (гидравлические и пневматические классификаторы, циклоны, грохоты) разделяется на готовый по крупности продукт и крупный, направляемый на доизмельчение в ту же мельницу. Таким образом, уменьшается переизмельчение материала и уменьшается энергопотребление мельницы. В работе [1] разработаны схемы основных типов замкнутых циклов измельчения и установлена степень влияния гранулометрического состава измельчаемого материала на производительность мельницы.

Цель данной работы – исследование кинетики измельчения в технологической схеме замкнутого типа. Требуется оценить влияние основных технологических параметров измельчения (динамики загрузки материала, времени измельчения, исходного фракционного состава, требуемой дисперсности) на показатели производительности. Для достижения цели исследования решались следующие задачи.

1. Построение имитационной модели взаимодействия технологического оборудования в заданной схемы измельчения.

2. Проведение экспериментов, сбор и анализ статистики поведения модели на основании проведенных экспериментов.

3. Разработка предложений по повышению эффективности измельчения.

Процесс измельчения минерального сырья в замкнутом цикле рассматривается как динамическая система. Под динамической системой понимают объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени, и задан закон (эволюция), который описывает изменение начального состояния с течением времени и позволяет по начальному состоянию прогнозировать будущее состояние динамической системы [2]. Выбор одного из способов описания закона эволюции задает конкретный вид математической модели соответствующей динамической системы.

Концептуальная модель исследуемой системы представлена в виде структурной схемы на рис. 1. Система состоит из одного входного потока материала (В), накопителя (Н), мельницы (М), классификатора (К), выходного потока (П). Реализация модели рассматривает движение материала во всей технологической системе при непрерывном замкнутом цикле измельчения (бункер-питатель, мельница и классификатор).

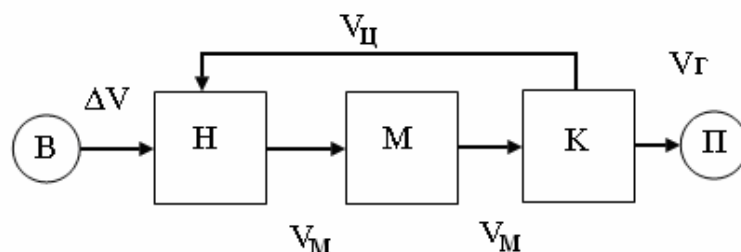


Рисунок 1 - Структурная схема модели

В модели предполагается, что поток представляет собой смесь разно фракционного сыпучего материала В, который дискретными порциями ΔV поступает в накопитель Н через равные промежутки времени Δt . В течение этого промежутка времени порция материала, находящаяся в накопителе V_M , поступает в мельницу М, измельчается, и весь продукт попадает в классификатор К. В классификаторе происходит отделение некоего объема готового материала $V_Г$, а объем материала $V_Ц = V_M - V_Г$ поступает в накопитель. Таким образом, $V_M = \Delta V + V_Г$.

Для соблюдения такого баланса предполагается что в начальный момент времени в мельнице находится объем материала V_m , т.е. первая подача объема ΔV в накопитель осуществляется одновременно с подачей потока готового продукта V_g . Для реализации этого условия в структурную схему модели введен переключатель K , который в момент пуска модели загружает в мельницу объем материала V_m , затем переключается и в течении всего времени работы модели находится в этом состоянии. В модели также предполагается что объем материала V_m , поступающий в мельницу, должен быть постоянным и принимается равным $V_m = k_m V_{\text{мел}}$, где $V_{\text{мел}}$ - объем мельницы, k_m - коэффициент загрузки мельницы, при которой процесс измельчения имеет наивысшую эффективность. Для определенности в соответствии с экспериментальными данными принимается, что $k_m = 0.75$.

В стационарном режиме накопитель получает объем материала V_g , одновременно генерируется подача объема $\Delta V = k_m V_{\text{мел}} - V_g$. Эти два объема складываются и поступают в мельницу. Таким образом, объем материала измельчаемый в мельнице всегда постоянен, а фракционный состав материала - различный.

Фракционный состав подвергается изменению в трех узлах технологической схемы: в смесителе, в который поступают два потока с различным грансоставом; в мельнице, где происходит измельчение крупных фракции; в классификаторе, в котором отделяются фракции готовой продукции. Поэтому фракционный состав материала в модели переменен и определяется коэффициентами $k[x]_i$, где $[x]$ индекс участка технологической схемы, где определяется этот коэффициент, а i - номер фракции гранулометрического состава смеси. При этом $\sum k[x]_i = 1$.

На рис. 2 показаны соответствующие коэффициенты на различных технологических участках измельчительной установки.

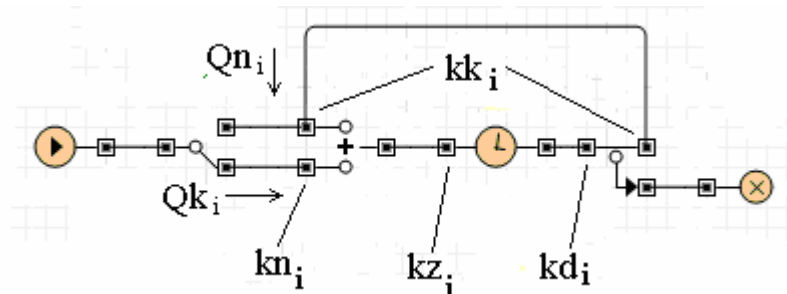


Рисунок 2 - Структурная схема модели в стационарном режиме

В начальный момент времени (в момент пуска модели) предполагается, что фракционный состав материала, находящегося в мельнице, соответствует составу поступающего потока материала и определяется матрицей коэффициентов kn_i

Гранулометрический состав материала поступающего в мельницу определяется зависимостью: $kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i)$, где Qn_i , Qk_i – расход i -й фракции с питателя и обратной ветви (циркуляционной нагрузки), соответственно; kn_i , kk_i – коэффициенты гранулометрического состава для i фракции, поступающей с питателя и обратной ветви. Гранулометрический состав материала вторичного потока материала, поступающего в мельницу после классификатора (циркулирующая нагрузка) определяется зависимостью:

$$kk_i = \sum (Qn_i + Qk_i)kd_i / \sum (Qn_i + Qk_i)$$

Гранулометрический состав материала, выходящего из мельницы, в данной модели определяется на основе кинетики измельчения, т.е. масса материала при измельчении за время Δt определяется селективной функцией измельчения Sij , которая показывает долю i фракции, разрушаемой за единицу времени. В разрабатываемой модели селективная функция задается треугольной матрицей коэффициентов измельчаемости a_{ij} , определяющих долю объема массы материала, которая переходит в результате разрушения из i фракции в j фракцию и определяется соотношениями $kd_n = kz_1 \cdot \sum_{j=1}^8 a_{nj}$, $n = 1...8$, для определенности выбрано восемь фракций.

Матрица селективной функции имеет вид

$$\begin{matrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ a_{12} & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & & \\ a_{18} & a_{28} & \dots & a_{78} \end{matrix}$$

В качестве среды моделирования был выбран язык моделирования AnyLogic - инструмент имитационного моделирования нового поколения, поддерживающий концепции и средства из нескольких методов моделирования: дискретно-событийного моделирования, системной динамики и агентного моделирования [3]. Основными строительными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира.

Активный объект является экземпляром соответствующего класса, который реализуется путем создания собственных активных объектов или использованием объектов библиотек AnyLogic и заданием их взаимосвязи. AnyLogic интерпретирует создаваемые классы активных объектов в классы Java. Поэтому модель позволяет пользоваться всеми преимуществами объектно-ориентированного моделирования.

В ходе экспериментов на модели проведено варьирование параметров модели (объема загружаемого материала и циркулирующей нагрузки, времени измельчения и исходного фракционного состава и требуемой дисперсности), получены зависимости этих параметров от других параметров во времени. При этом реализован мониторинг изменения основных структурных элементов технологической схемы; характеристик гранулометрического состава на каждом элементе технологической схемы; величины потоков в отдельных ветвях технологической схемы, значения рабочего заполнения мельницы в течение всего процесса. Исследования изменения зависимости расхода исходного материала и готового продукта показал существующую зависимость производительности мельницы от загрузки мельницы и крупности исходного материала на начальном этапе измельчения. После установления стабильной работы мельницы производительность зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных фракций в общем объеме материала до измельчения и после него. Это позволяет разработать оптимизационные критерии управления производительностью мельницы на основе контроля объема загрузки материала и циркулирующей нагрузки в зависимости от образованной удельной поверхности материала, вычисляемой по соотношениям отдельных фракций материала.

На основе испытания модели было определено выражение для переключателя K , названного показателем переизмельчения и задаваемого отношением объема самой мелкой фракции на входе в мельницу к объему самой крупной фракции на выходе из мельницы при поступлении продукта в классификатор $K = k_{z5}/k_{d1}$. Таким образом, объем поступающего материала в мельницу определяется формулой $V_n = K \cdot k_M V_M - V_{\text{ц}}$.

На рис 3. показаны результаты эксперимента по определению влияния дисперсности материала на производительность установки измельчения.

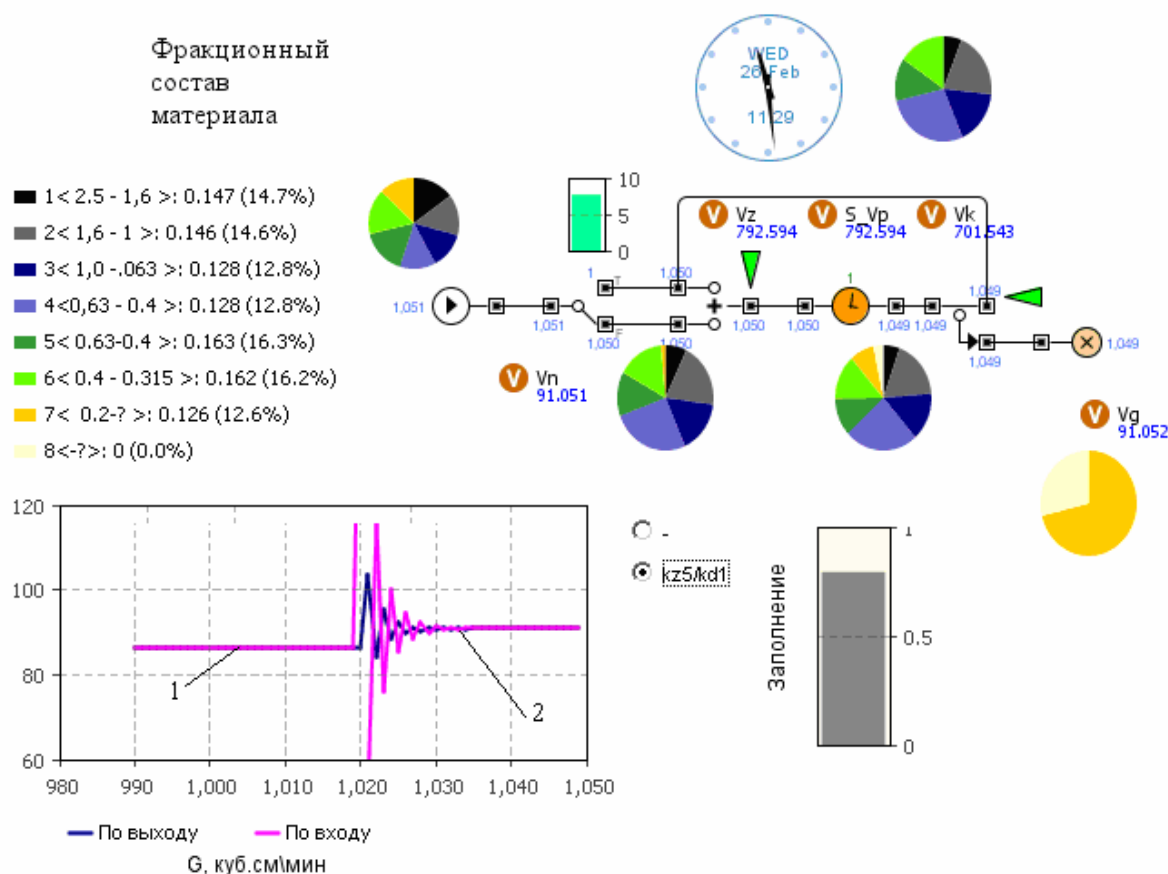


Рисунок 3 - Общий вид рабочего окна программы при испытаниях модели

На графике $G(t)$ рис. 3 цифрой 1 обозначена производительность при $K = 1$, т.е. когда не учитывается влияние объема поступающих мелких фракций. После переключения на режим контроля переизмельчения, т.е. при $K > 1$, наблюдается повышение производительности на 5-7% при прочих равных условиях (кривая 2).

Выводы

1. Показана возможность применения данного метода моделирования для исследования процесса измельчения в технологических схемах замкнутого цикла.

2. Данная модель описывает только кинетику фракционного состава в узлах технологической схемы замкнутого цикла. Динамика процессов в самом помольном узле должна быть рассмотрена с других позиций.

3. Данная модель может быть использована для создания системы управления технологическим процессом

4. Комплекс разрабатываемых моделей необходимо исследовать на примере работы мельниц различного типоразмера, в частности лабораторных и промышленных струйных мельницах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилов П.И. Снижение энергопотребления в замкнутых циклах тонкого измельчения руд / П.И. Пилов, Н.С. Прядко //. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – вып. 6. – С. 173 – 181.
2. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой: лекции сороковского профессора: Учеб. Пособие. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.-144с.
3. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М. В. Киселева. Екатеринбург: УГТУ - УГЛИ, 2009. 88с.

А.М. Шевелёва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ДОЗВУКОВОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЛОКАЛЬНОЙ ЩЕЛИ НА ПЛАСТИНУ

В данной работе экспериментально исследованы характеристики плоской воздушной струи, истекающей в затопленное пространство на поверхности пластины. Обнаружено хорошее согласование экспериментальных и теоретических данных в начальном участке на оси струи, а также отличия в остальных сечениях, вызванные наличием поверхности, ограничивающей движение струи.

Ключевые слова: пристеночное течение, плоская струя, затопленное пространство, скорость потока, безразмерный профиль скорости

Введение. В различных областях техники используются дозвуковые и сверхзвуковые газовые потоки. Их изучением занимались многие исследователи. В настоящее время известно несколько теорий свободной турбулентности: Прандтля, Тейлора, Рейхардта, Маттколи [1]. В этих теориях рассматриваются свободные беспределельные плоско-параллельные и осесимметричные струи, истекающие из узкого отверстия в затопленное пространство. Поскольку свободная турбулентность является простейшим, наименее зависимым от влияния вязкости случаем турбулентности, то ее изучение может служить предварительным шагом для изучения турбулентных потоков вообще. Так, на основе теории свободной турбулентности Прандтля решены (Толмин) три задачи о распространении свободных затопленных струй несжимаемой жидкости, разработаны законы течения в следе за обтекаемым телом для плоского (Шлихтинг) и осесимметричного (Свен) случая.

В технических приложениях представляют интерес разработанные теории расчета характеристик дозвуковых и сверхзвуковых струй, истекающих в каналы. В технологическом оборудовании для струйного измельчения используется система воздухопроводов, эжекторы, сопла, разгонные трубки, служащих для подачи и разгона двухфазных потоков энергоносителя и частиц материала, которые из-

мельчаются в камере мельницы при противоточном столкновении. Несмотря на известные достоинства струйных измельчителей - отсутствие вращающихся деталей и мелющих тел, малый уровень шума при работе, надежность, относительно небольшие размеры и высокую дисперсность готового продукта и отсутствие примесей в нем, - они обладают рядом недостатков, сдерживающих их активную эксплуатацию для получения особо тонких и чистых продуктов. Одним из главных таких недостатков является повышенный износ элементов конструкции измельчителей, в частности износ разгонных трубок.

Для исследования закономерностей износа разгонных трубок измельчителя вследствие воздействия на них движущегося в потоке воздуха материала необходимо рассмотреть газодинамических характеристик пристеночной струи. Используя свойства пристеночных струй можно разрабатывать защитные устройства для энергетических аппаратов и технических средств в различных областях техники.

Цель данной работы состоит в исследовании характеристик воздушной струи, истекающей из локальной щели в затопленное пространство на поверхности пластины.

В экспериментальных работах Толмина исследовались характеристики струи, истекающей из узкой щели в бесконечное пространство (см. рис. 1), при этом использование одной экспериментальной константы давало возможность привести их результаты в соответствие с теорией.

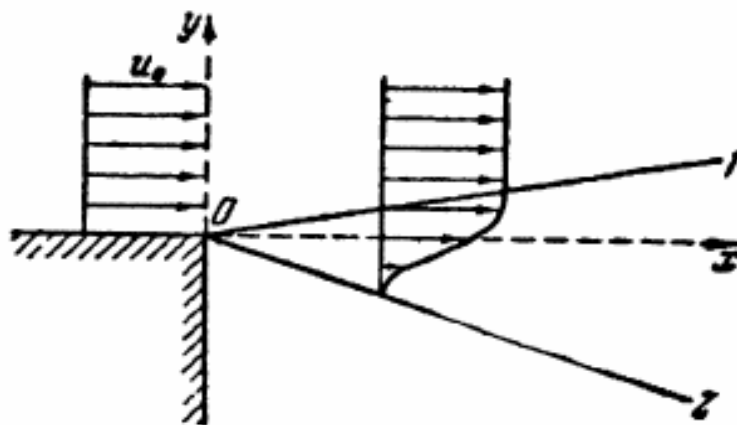


Рисунок 1 - Истечение свободной струи из щели в бесконечное пространство

Основная часть. На основе теории истечения струй разработана методика расчета характеристик струи, истекающей из узкой щели

на пластину, и проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

В качестве исходных начальных данных положим следующие начальные параметры: начальное давление и температура воздуха P_0 , T_0 . Считаем, что окружающий спутный поток неподвижен, т.е. $W_B=0$.

Для расчета скорости на определенном расстоянии от щели, необходимо знать скорость воздуха на выходе из плоского сопла, его форму и тип воздушной струи, который им формируется. Таким же образом можно рассмотреть, как изменяются скорости в каждом профиле струи.

На центральной оси плоской воздушной струи скорость воздуха

рассчитывается следующим образом: $w_m = K \cdot w_0 \sqrt{\frac{b_0}{x}}$, где w_m –

скорость на оси струи (м/с); x – расстояние от полюса струи до точки, в которой определяется скорость (м); b_0 – половина высоты щелевидного сопла (м); w_0 – скорость на выходе из щели (м/с), K – коэффициент, принимался $K=3,8$. Для расчета скоростей в остальных точках плоской струи воспользуемся теорией турбулентности Толмина. Им было исследовано распределение скорости в свободном потоке, образующемся при истечении через узкую прямолинейную щель. Формула для расчета скорости имеет вид: $\frac{w}{w_m} = F'(\varphi)$, где $\varphi = \frac{y}{0,09x}$. Функция

$F(\varphi)$ определялась с помощью введения зависимой переменной $z = \ln F(\varphi)$. Более подробные выкладки представлены в работе [1].

$F(\varphi)$ определялась с помощью введения зависимой переменной $z = \ln F(\varphi)$. Более подробные выкладки представлены в работе [1].

Полученные теоретические характеристики струи сравнивались с экспериментальными данными. Рассмотрены две методики для расчета скорости струи на основе экспериментальных данных [2, 3].

Для расчета скорости газа, движущегося в струе, можно воспользоваться изоэнтропическими формулами, осуществляющими параметрическую связь между давлением и скоростью потока при помощи приведенной скорости λ [2]:

$\frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$, где p – статическое давление потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

тическое давление потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

баты. Следовательно, $\lambda = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{k+1}{k-1}}$. Учитывая, что

$a = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}$, а приведенная скорость $\lambda = \frac{w}{a}$, получим окончательно формулу для вычисления скорости потока газа в потоке:

$$w = \lambda \cdot a = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{k+1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{kp}{\rho}}. \quad (1)$$

Также для расчета изменения скорости по длине разгонной трубки можно использовать модель, полученную для элементарной струйки, т.е. модель одномерного течения (метод 2). Скорость газа находится из уравнения Бернулли, записанного для элементарной

струйки [3] $p + \frac{\rho w^2}{2} = p^*$. Отсюда

$$W = \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho}}. \quad (2)$$

Плотность воздуха рассчитывается по формуле $\rho \cong \frac{B_0}{R \cdot T_0}$ [кг/м³], где $R = 287,3$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная воздуха, B_0 – атмосферное давление, T_0 – температура.

Для определения скорости потока, движущегося с дозвуковой скоростью, необходимо измерить статическое и полное давления в одной и той же точке потока. Однако для большей точности расчетов следует измерять не каждое давление, а разность полного и статического давлений $(p^* - p)$ [Па] .

Постановка эксперимента. Исследования проводились на плоской модели пристеночной струи, истекающей на пластину. Схема установки представлена на рис. 1. Плоская модель состоит из ресивера (1), через который подается воздух в магистрали модели; рабочей поверхности (2), оснащенной плоским соплом с регулируемым сечением (3), а также регулировочных прокладок (4), посредством которых осуществляется контроль над подачей воздуха в сопло. Плоское

сопло в данных экспериментах представляет собой щель размерами $20 \times 5,5$ мм.

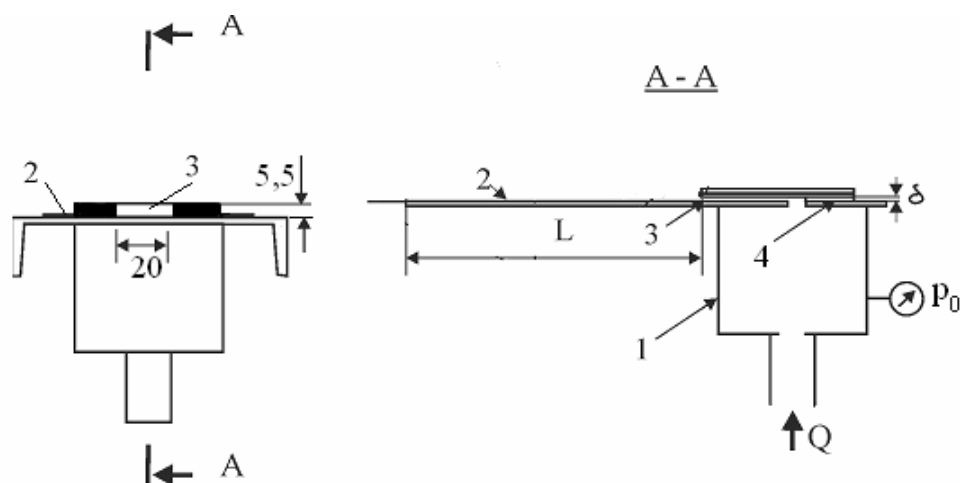


Рисунок 2 - Схема установки для испытаний плоской модели пристеночного течения: 1 - ресивер; 2 - рабочая поверхность; 3 - регулируемое сечение сопла; 4 - регулировочные прокладки

Ход эксперимента состоял в следующем. Установка подключалась к источнику воздуха. После открытия запорного вентиля на баллонной батарее через ресивер (1) подавался воздух в сопло модели через регулируемое сечение (3). Затем устанавливались заданные режимы по давлению воздуха на входе в плоское сопло $p = 0,05$ МПа, начальная скорость потока $w_0 = 54$ м/с, проверялась работоспособность устройства на рабочих режимах. Для измерения разности полного и статического давлений использовалась трубка Пито-Прандтля. Измерялись и фиксировались перепады давлений $p^* - p$ в различных точках потока.

Исследования осуществлялись при следующих условиях окружающей среды: атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 4°C . Измерения давлений потока производились в точках на расстоянии от щели $x = 40; 55; 70; 100; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 250; 270$ и 290 мм. При этом первые 5 сечений находятся в начальной зоне струи, следующие три – переходном участке и последние 5 – в основной зоне струи

Исследовались распределения скоростей, вычисленные по разным методикам, описываемым итоговыми формулами (1) и (2) соответственно, которые сравнивались с теоретическими характеристиками струи. Анализ результатов показал, что величины скорости струи,

вычисленные по разным методикам, соответственно по формулам (1) и (2) достаточно близки. Поэтому далее приведены результаты расчетов по первой методике, и они использовались в дальнейшем анализе. На рис. 3 показаны результаты экспериментального и теоретического определения скорости струи в выбранных точках на центральной оси струи.

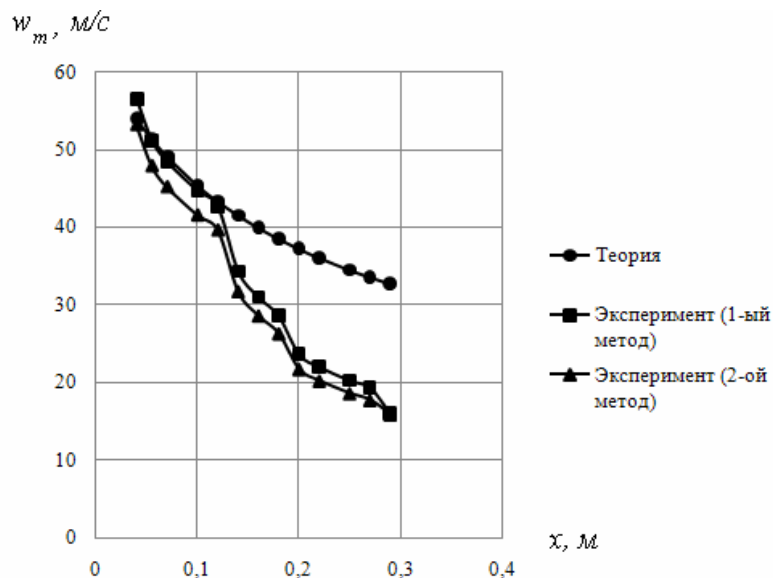


Рисунок 3 - Распределение скоростей вдоль центральной оси струи на уровне пластины при измерении при $P_0=0,05$ МПа

Результаты экспериментальных исследований совпадают с теоретическими данными на начальном участке, т.е. при $x = 40 - 120$ мм. Далее отличие в скорости струи объясняется явлением растекания струи по пластине, т.к. при экспериментальных исследованиях рассматривалась локальная струя, ограниченная снизу пластиной, из-за чего энергия ее была уменьшена. В теоретических расчетах рассматривалась безграничная струя.

Сравнивались результаты вычислений безразмерной скорости в сечениях струи, когда вместо абсолютной скорости откладывалось ее отношение к скорости на оси струи, а вместо расстояния от оси струи – его отношение к расстоянию от оси до точки, в которой скорость равна половине осевой. В безразмерных координатах профили скорости плоской струи оказываются аффинными (см. рис. 4). Различие в уровнях распределения скоростей в сечениях объясняется различными граничными условиями теоретических расчетов и экспериментальных результатов.

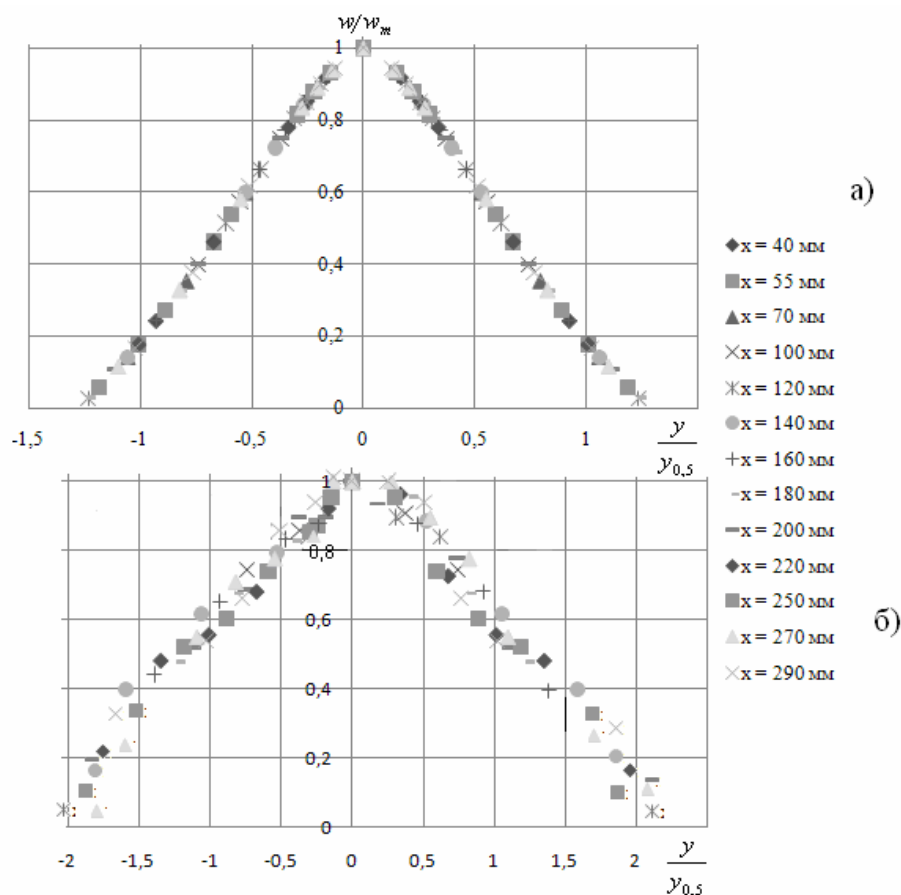


Рисунок 4 - Безразмерный профиль скорости во всех сечениях модели по теоретическим (а) и экспериментальным (б) расчетам

Выводы. В ходе исследования пристеночной струи, истекающей из локальной щели в затопленное пространство на пластине, был выявлен характер струи на начальном и основном участках. Экспериментальные данные на оси начального участка находятся в хорошем согласовании с теоретическими характеристиками струи, полученными на основе теории турбулентности Толмина. Выявлены отличия характеристик струи, истекающей из узкой щели в бесконечное пространство и на пластину. Доказана афинность безразмерного профиля скорости струи, истекающей из узкой щели, полученного расчетным и экспериментальным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенников С. Ю. и др. Под ред. Абрамовича Г. Н. Теория турбулентных струй. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 716с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7 изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840с.
3. Зуев Ю. В. Одномерные течения жидкостей и газов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 80с.

К.М. Басс, В.В. Кривда

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УКЛОНОВ КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГ ПО ВРЕМЕНИ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. В статье приведены исследования производительности карьерного автосамосвала на базе расчета и определения оптимальных уклонов карьерных автодорог по времени транспортирования горной массы.

Ключевые слова. Автосамосвал, уклон карьерной дороги, скорость движения.

Производительность карьерного автосамосвала – одна из основных характеристик карьерного автотранспорта, определяющая многие технические и технико-экономические показатели, в конечном итоге – затраты на транспортирование горной массы. Как правило, целью совершенствования и разработки новых горнотранспортных средств является повышение производительности при транспортировании горной массы. Вместе с тем следует проанализировать с возможностью перехода на повышенный уклон автодороги, что обусловлено применением механизма изменения положения центра масс и межосевого расстояния (МЦМ) [3], позволяющего изменять центр масс и межосевое расстояние карьерной автомобильной техники, сохраняя при этом тяговые свойства электродвигателей.

Исследования показали, что при наличии возможности изменения межосевого расстояния (базы автосамосвала рис.1), применив механизм для изменения положения центра масс и межосевого расстояния (МЦМ), происходит значительное уменьшение необходимой силы тяги при движении по дороге с продольным уклоном 7%, о чем свидетельствуют результаты, представленные на рис.2 [3].

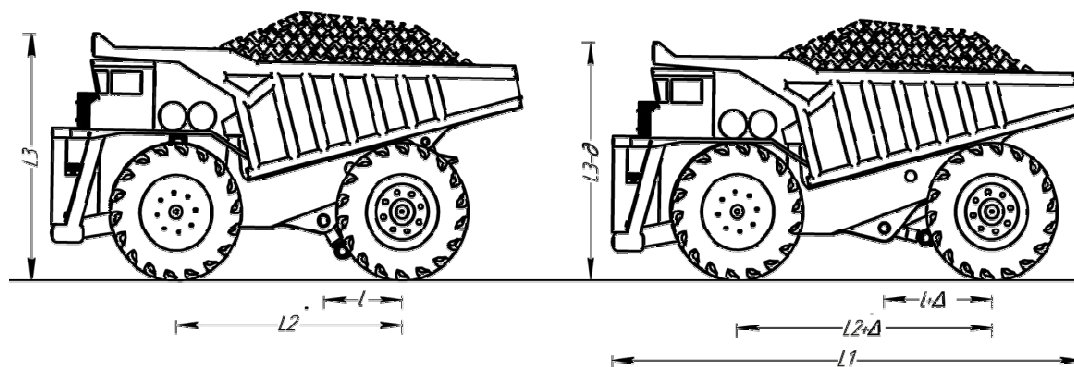


Рисунок.1 – Карьерный автосамосвал с обычным и измененным межосевым расстоянием

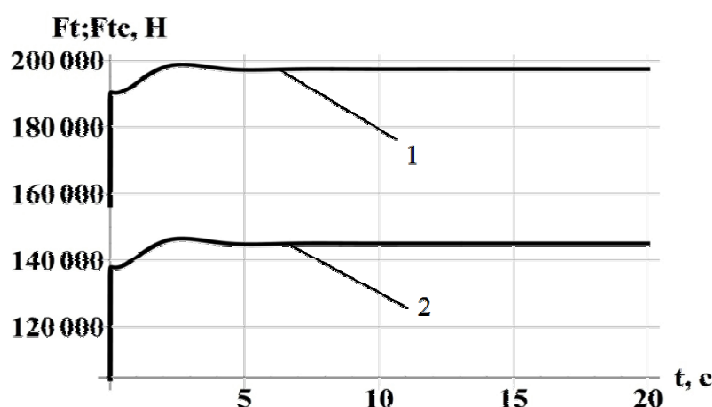


Рисунок 2 – Сила тяги всей системы, приложенная к ведущим колесам по дороге с продольным углом наклона $i = 7\%$:

- 1 – с обычной базой (межосевое расстояние $L=5,3\text{м}$);
- 2 – с измененной базой (межосевым расстоянием $L=5,96\text{м}$)

Сохранение тяговых характеристик электродвигателей автосамосвалов с МЦМ дает возможность увеличить продольный уклон автомобильной дороги.

Поскольку вся совокупность горнотехнических условий в случае применения автосамосвала с МЦМ делится на две области, определяющие два основных режима работы автосамосвала (с полным применением МЦМ, без него), для каждого режима работы автосамосвала с МЦМ определена возможность перехода на повышенный уклон дороги при необходимой среднетехнической скорости.

Основой для расчета производительности карьерных автосамосвалов является определение оптимальных уклонов карьерных автодорог по времени транспортного процесса.

Суммарное время движения автосамосвалом в грузовом и порожнем направлении при работе на подъем горной массы на 1 м составит (T , с) [2].

$$T = T_{\Gamma} + T_{\Pi},$$

где T_{Γ} – время движения груженого автосамосвала по уклону, с;

T_{Π} – время движения порожнего автосамосвала на спуск, с.

Длина транспортирования (L , м) при подъеме горной массы на 1 м составит [1]

$$L = 1/i.$$

Тогда T_{Γ} :

$$T_{\Gamma} = \frac{3,6L}{v_{\Gamma}} = \frac{3,6(G_a + k_{\Gamma} G) \left(\frac{\omega_0}{i} + 1 \right)}{0,367 N_{\Gamma} k_N \eta_a},$$

где N_{Γ} – мощность двигателя, кВт;

k_N – коэффициент использования мощности двигателя;

v_{Γ} – скорость движения, км/ч.

Время движения порожнего автосамосвала на спуск:

$$T_{\Pi} = \frac{3,6L}{v_{\Pi}} = \frac{3,6}{v_{\Pi} \cdot i},$$

v_{Π} – скорость порожнего автосамосвала на спуске с уклоном i , км/ч.

Тогда суммарное время транспортирования горной массы

$$T = \frac{3,6 (G_a + k_{\Gamma} G) \left(\frac{\omega_0}{i} + 1 \right)}{0,367 N_{\Gamma} k_N \eta_a} + \frac{3,6}{v_{\Pi} \cdot i}.$$

Время транспортирования горной массы при работе на подъем и спуск на высоту 1 м составит (T , с)

$$T = \frac{3,6 G_a \left(\frac{\omega_0}{i} + 1 \right)}{0,367 N_{\Gamma} k_N \eta_a} + \frac{3,6}{v_{\Gamma} \cdot i}.$$

v_{Γ} – скорость движения груженных автосамосвалов на спуске с уклоном i , км/ч.

Скорости движения груженных и порожних автосамосвалов в тормозном режиме (v_{Γ} , v_{Π}) определяются условиями безопасности и зависят от уклона и коэффициента сопротивления качению. Путем обработки тормозных характеристик автосамосвалов БелАЗ получены регрессионные зависимости следующего вида [1]:

$$v_{II} = A (i - \omega_0)^C.$$

$$v_{II} = e^{B+C(i-\omega_0)},$$

A, B, C, D – эмпирические коэффициенты (табл.1)

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты для определения скоростей движения автосамосвалов в тормозном режиме

Модель и грузоподъемность автосамосвала	Эмпирические коэффициенты			
	A	B	C	D
БелАЗ-75491 (80 т)	15,58	4,23	-0,51	-8,279
БелАЗ-7514 (120 т)	7,723	4,22	-0,62	-7,38
БелАЗ-7513 (130 т)	37,15	4,18	-0,05	-10,75

При сравнении расчетных данных по скоростям движения сходимость результатов составляет 95% [4, 5].

При движении груженых автосамосвалов под уклон сила сопротивления становится отрицательной, что означает увеличение ускорения автосамосвала. отсюда следует, что на спуск необходимо держать постоянную скорость на протяжении всего спуска, необходимо установить приемлемую скорость на дороге с продольным уклоном, эксплуатационную и выше, характеризуюсь должной безопасностью движения под уклон и реакцией водителя [1].

$$v_{II} = v_B - t_3 a,$$

где v_{II} – скорость груженого автосамосвала на спуске, км/ч;

v_B – безопасная скорость на спуске, км/ч ($v_B = 28 \pm 32$ км/ч);

t_3 – время запаздывания (реакция водителя), $t_3 = 0,28 \pm 1,5$ с;

a – ускорение автосамосвала при движении под уклон, км/ч·с

$$a = 3,6g k_{инер} (i - \omega_0),$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

$k_{инер}$ – коэффициент инерции ($k_{инер} = 1,4$).

Значения оптимальных уклонов по времени движения находятся в пределах 10-14 % для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией (ЭМТ). Оптимальные уклоны по времени движения (производительности) на 18-20 % превышают значения оптимальных уклонов критерию удельных энергозатрат.

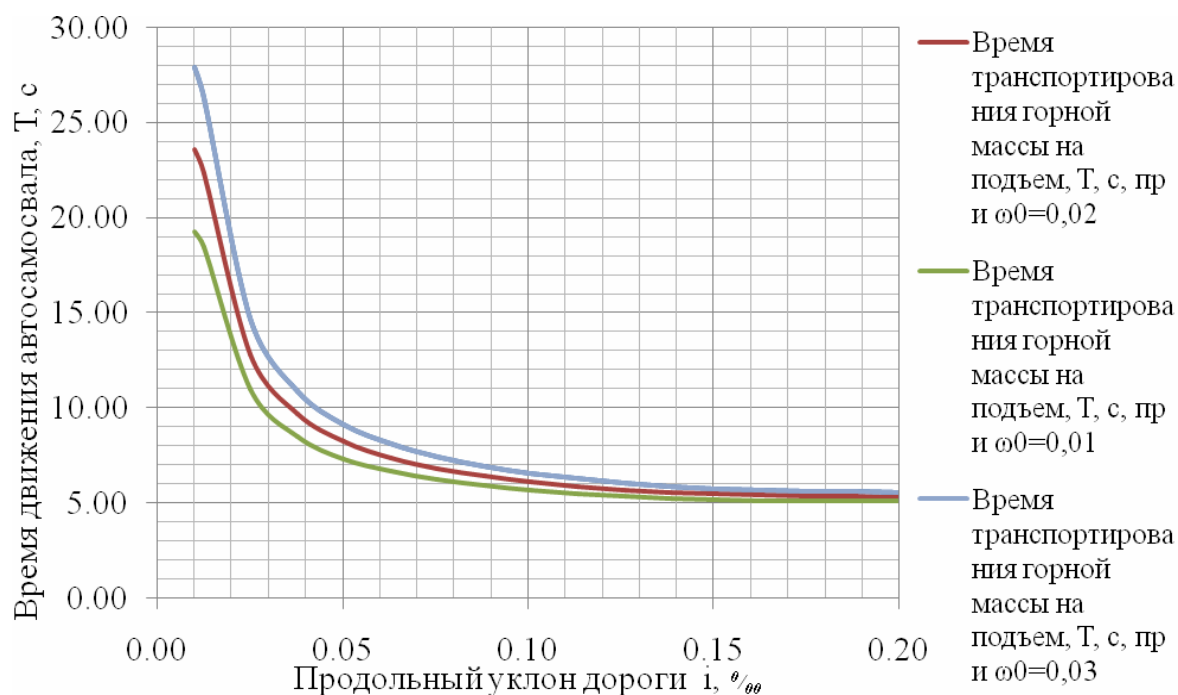


Рисунок 3 – Зависимость времени движения автосамосвала БелАЗ-7512 (120 т) в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м, при работе на подъем горной массы

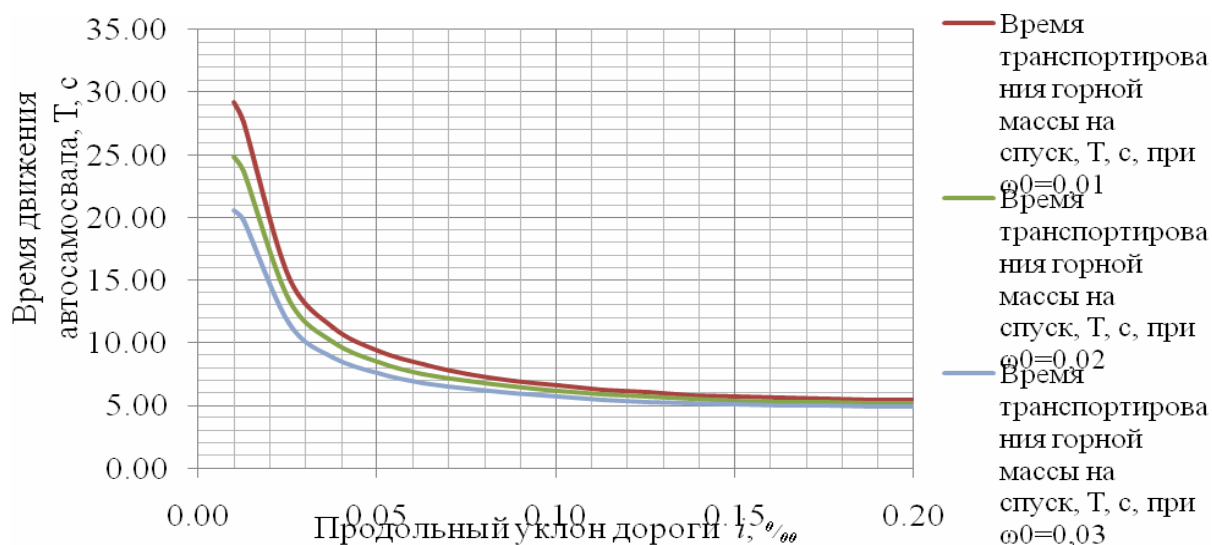


Рисунок 4 – Зависимость времени движения автосамосвала БелАЗ-7512 (120 т) в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м, при работе на спуск горной массы

Принцип наименьшего действия относится к интегральным вариационным принципам механики, согласно которым из всех возможных движений механической системы истинным является то, для которого некоторая физическая величина, называемая действием, имеет за время перемещения системы экстремум, обычно минимум.

Выводы

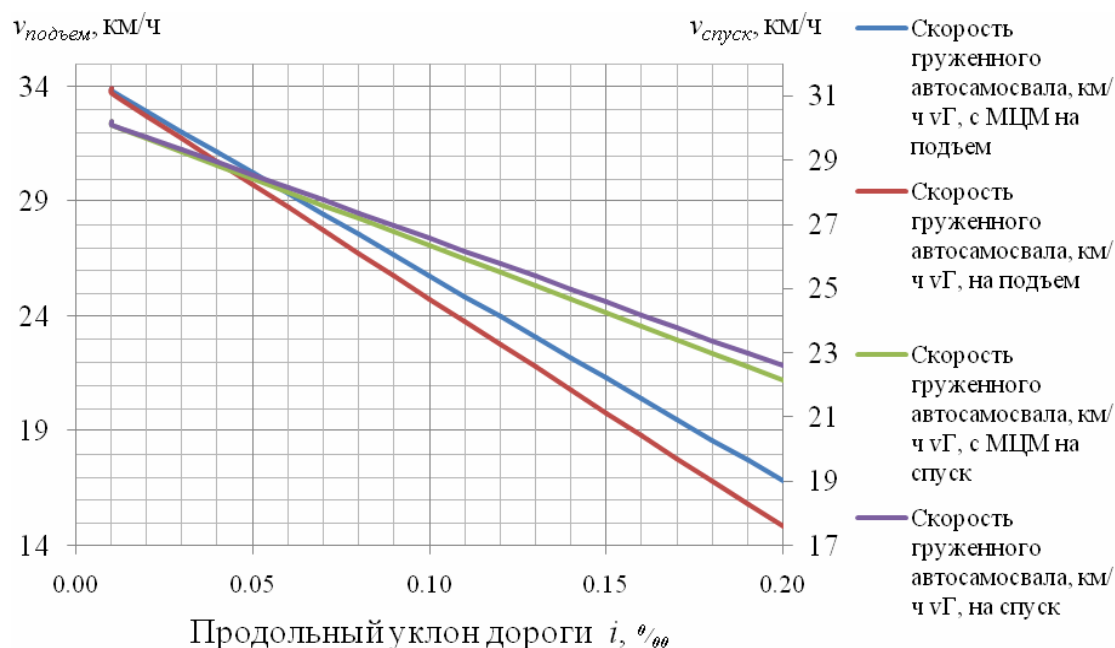


Рисунок 5– Скорость движения автосамосвала БелАЗ-7512 (120 т) на спуск и подъем с применением МЦМ

Для оптимизации уклонов автодорог на нагорно-глубинных карьерах обосновано использование следующих физических критериев:

- величина удельных затрат энергии на подъем (спуск) 1 т горной массы на 1 м (г/т·м);
- суммарное время движения по уклону в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м (с);
- удельные действие - комплексный критерий, представляющий собой произведение удельных затрат энергии на подъем (спуск) горной массы автосамосвалами на 1 м, и времени подъема (спуска) горной массы на 1 м (г·с/т·м).

На основании исследований установлено:

1. Зависимости удельных затрат энергии автосамосвалами с различным типом трансмиссии (с МЦМ и без МЦМ) от уклона автодорог имеют экстремальный характер, что определяется изменением

коэффициентов полезного действия трансмиссии (η_a), удельного расхода топлива при номинальной нагрузке двигателя (g_H) и скоростей движения (v_H, v_T) от суммарного сопротивления движению ($\omega_0 + i$). Оптимальные значения уклонов автодорог для автосамосвалов с ЭМТ по критерию энергозатрат составляют от 8 до 12 % в зависимости от качества дорожного покрытия.

2. Зависимости изменения удельного расхода топлива от уклона для автосамосвалов с гидромеханической трансмиссией имеют менее выраженный экстремальный характер, а оптимальные уклоны по энергетическому критерию на 15-20 % выше, чем у автосамосвалов с ЭМТ. Это преимущество в наибольшей степени проявляется в глубоких карьерах при работе автосамосвалов в качестве магистрального транспорта.

3. Оптимальные уклоны по времени движения (производительности) на 18-20 % превышают оптимальные значения уклонов по критерию удельных энергозатрат. При работе автосамосвалов на спуск горной массы оптимальные уклоны по критериям энергозатрат и удельного действия находятся в зоне технических ограничений.

4. Комплексный критерий «удельное действие», связывающий удельную энергоемкость автотранспорта с производительностью, может использоваться для оптимизации удельной мощности автосамосвалов, к.п.д. трансмиссии и других конструктивных параметров.

5. Оптимальный уклон по физическим критериям следует рассматривать как частный оптимум и нижний предел уклона, который рекомендуется принимать при проектировании транспортных систем нагорно-глубинных карьеров. Окончательное решение по руководящим уклонам следует принимать на основе экономических критериев, учитывающих влияние уклона на технологические параметры горных работ.

Таблица 3

Скорость и время транспортирования горной массы карьерным автосамосвалом

Уклон автодороги, ‰	Повышенный уклон автодороги, ‰	Скорость груж. автосамосвала, км/ч $v_{г}$, с $M_{гМ}$ на подъем	Скорость груж. автосамосвала, км/ч $v_{г}$	Скорость груж. автосамосвала, км/ч $v_{г}$, на спуск	Ускорение a , м/с ²	Время транспортирования горной массы на подъем, Т, с, при $\omega_0=0,03$	Время транспортирования горной массы на подъем, Т, с, при $\omega_0=0,02$	Время транспортирования горной массы на спуск, Т, с, при $\omega_0=0,03$	Время транспортирования горной массы на спуск, Т, с, при $\omega_0=0,02$	Время транспортирования горной массы на спуск, Т, с, при $\omega_0=0,01$	
0,0	0,0	33,93	30,20	30,20	0,19	27,89	23,57	19,25	29,20	24,88	20,56
0,01	0,01	33,83	30,09	30,12	0,70	26,24	22,34	18,44	27,55	23,65	19,75
0,02	0,03	32,93	29,68	29,72	0,80	14,67	12,83	10,99	15,26	13,42	11,58
0,03	0,04	32,03	29,26	29,33	0,31	10,90	9,70	8,51	11,24	10,05	8,86
0,04	0,05	31,14	28,85	28,94	0,82	9,11	8,22	7,33	9,33	8,44	7,55
0,05	0,06	30,24	28,43	28,55	1,33	8,10	7,39	6,67	8,25	7,53	6,82
0,06	0,08	29,35	28,01	28,15	1,83	7,44	6,84	5,92	7,53	6,93	6,33
0,07	0,09	28,45	27,60	27,76	2,34	6,94	6,43	5,67	6,99	6,47	5,96
0,08	0,10	27,55	27,18	27,36	2,85	6,57	6,12	5,49	6,58	6,14	5,69
0,09	0,11	26,66	26,76	26,97	3,35	6,29	5,89	5,35	6,27	5,87	5,47
0,10	0,13	25,76	26,34	26,57	3,86	6,07	5,71	5,25	6,02	5,67	5,31
0,11	0,14	24,87	25,93	26,18	4,37	5,90	5,57	5,18	5,84	5,51	5,18
0,12	0,15	23,98	25,51	25,78	4,87	5,78	5,48	5,18	5,69	5,39	5,09
0,13	0,16	23,08	25,09	25,39	5,38	5,69	5,41	5,13	5,58	5,30	5,02
0,14	0,18	22,19	24,67	24,99	5,89	5,63	5,37	5,11	5,50	5,24	4,98
0,15	0,19	21,30	24,25	24,59	6,39	5,60	5,35	5,10	5,45	5,20	4,95
0,16	0,20	20,40	23,83	24,19	6,90	5,58	5,34	5,11	5,41	5,17	4,93
0,17	0,21	19,51	23,41	23,79	7,41	5,58	5,35	5,13	5,38	5,16	4,93
0,18	0,23	18,62	22,99	23,39	7,92	5,59	5,37	5,16	5,37	5,15	4,94
0,19	0,24	17,73	22,57	22,99	8,42	5,61	5,40	5,20	5,36	5,16	4,95
0,20	0,25	16,84	22,15	22,59	8,93	5,64	5,44	5,24	5,37	5,17	4,97

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошилов, Г.А. Обоснование оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Горшков Э. В. - Свердловск, 1984. - 212 с.
2. Журавлев, А.Г. Обоснование параметров транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с энергосиловой станцией [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Журавлев, А.Г. - Екатеринбург: РАН УИГД, 2007. - 176 с.
3. Кривда В.В. Обоснование эксплуатационно-технологических параметров карьерных автосамосвалов /Кривда В.В. // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні// Сборник /Днепропетровск, 2013.
4. Коллинс, Дж. Проектирование, строительство и эксплуатация карьерных автомобильных дорог [Текст] / Дж. Коллинс, К. Фитас, Рей К. Сингал // Международный журн. по открытым горным работам. - 1992. - № 1. — С. 45-54.
5. Лель, Ю. И. Методы расчета параметров устойчивой работы автотранспорта глубоких карьеров [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Лель Юрий Иванович. — Екатеринбург, 1999. - 297 с.

В.Е. Белозеров, В.Г. Зайцев

НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕКУРРЕНТНЫЙ АНАЛИЗ В ОБРАБОТКЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Аннотация. Рассматриваются основные положения и возможности обработки временной информации с помощью рекуррентного анализа. Указываются направления его развития и использования для реальных процессов.

Ключевые слова: Рекуррентный анализ, моделирование, временной ряд.

Введение

Моделирование по временным рядам, полученным в процессе эксперимента (по дискретным последовательностям данных), является одним из активно развивающихся современных направлений математического моделирования. При изучении сложных природных явлений, временной ряд зачастую представляет собой единственную имеющуюся у исследователя информацию. Поэтому наиболее полное раскрытие свойств исследуемого процесса, содержащихся в данных наблюдений — одно из условий успешного построения модели. С другой стороны, исследование временных рядов играет важную роль и при работе с уже построенными математическими моделями. Как правило, это задачи связанные с подбором коэффициентов уравнений, верификации уравнений, изучения свойств самой модели. Это особенно актуально при моделировании динамических систем с хаотическим поведением, а точнее нелинейных динамических систем.

Правильное построение математической модели зависит от того, насколько полно был выполнен анализ исходных данных, выявлены и оценены свойства изучаемого объекта (процесса). Корректность построенной модели зависит от того, насколько полно была проанализирована и сама модель. В случае выявления недостаточной адекватности модели процесс повторяется заново с одного из этапов, что требует дополнительных временных, материальных и других затрат. Общепринято, что при динамическом моделировании основным критерием оценки правильности математической модели является

адекватность прогноза поведения исходной реальной системы. В настоящий момент средства анализа временных рядов являются одним из важнейших инструментов исследователя при моделировании.

Начиная с 1981г. набор традиционных (линейных) методов исследования временных рядов был существенно расширен нелинейными методами, полученными из теории нелинейной динамики и хаоса; многие исследования были посвящены оценке нелинейных характеристик и свойств естественных и искусственных систем. Большинство методов нелинейного анализа требуют либо достаточно длинных, либо стационарных рядов данных. Однако их далеко не всегда можно получить при практическом исследовании реальных систем. Более того, Манука (Manuca) и Савит (Savit) показали, что данные методы дают удовлетворительные результаты даже для идеализированных моделей реальных систем.

Известны следующие этапы математического моделирования, которые в целом сводятся к такой последовательности действий: 1. Получение и анализ наблюдаемых временных рядов (исходные данные) для постановки задачи; 2. Описание аналитической модели; 3. Выбор структуры модели: тип уравнений, вид функций, установление связи переменных с наблюдаемыми величинами; 4. Настройка модели: расчет (подбор) параметров; 5. Верификация модели (проверка ее адекватности); 6. Применение для анализа конкретного реального процесса.

Моделирование на основе временного ряда

Пусть результаты измерения реального процесса представлены в виде временного ряда или рядов $\{\vec{u}_i\}_1^n \equiv \{\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n\}$, где $\vec{u}_i = \vec{u}(t_i), t_i = i\Delta t$, n - количество данных наблюдения, Δt - интервал времени между измерениями. Чаще всего имеем одномерный ряд, так как зачастую нет информации обо всех переменных, или нет возможности их измерить. Далее, выполняется анализ и осуществляется словесное описание модели с учетом полученной информации из временного ряда, а также другой априорной информации, известной нам ранее. Создается математическая модель - это может быть детерминированная конечномерная модель в виде разностных уравнений вида $\vec{x}_{n+1} = \vec{F}(\vec{x}, \vec{c})$, обыкновенных дифференциальных уравнений вида $\dot{\vec{x}} = \vec{F}(\vec{x}, \vec{c})$, здесь $\vec{x}$, n -мерный вектор состояния, $\vec{F}$ - вектор-функция,

$\vec{c}$, n -мерный вектор параметров, n - дискретное время для первой модели, а во второй – непрерывное время. На этом этапе осуществляется выбор типа и числа уравнений, определяется вид входящих в уравнение функций ($\vec{F}$) и число переменных (компонент вектора $\vec{x}$).

Отметим, что в качестве переменных могут быть выбраны и наблюдаемые величины $\vec{x} \equiv \vec{u}$, но в общем случае может иметь место связь между ними $\vec{u} = h(\vec{x})$, где $h(x)$ некоторая измерительная функция. Далее, требуется осуществить выбор значений параметра c , для настройки модели. И наконец, осуществить верификацию построенной модели, т.е. проверка ее адекватности реальному процессу. Если она не удовлетворяет этому требованию - ее дорабатывают с учетом получаемых результатов.

Таким образом, видно, что средства анализа временных рядов занимают важное место на этапах эмпирического построения математической модели и играют большую роль в получении качественных результатов. Развитие теории нелинейной динамики и хаоса внесло понимание преимущества нелинейной сущности природных явлений, и моделирование в последние годы осуществляется в основном с использованием нелинейных разностных и дифференциальных уравнений различной размерности. Используемые ныне методы нелинейного анализа оказались малоприспособленными для исследований исходных временных рядов. По полученному в результате наблюдений временному ряду $\{\vec{u}_i\}_1^n$ можно судить о свойствах и поведении системы уже просто построив графическое изображение траектории в соответствующем фазовом пространстве (периодические или хаотические системы имеют портреты характерного вида). Однако, при размерностях 3 и более, такой анализ весьма затруднен, так как становится необходимым делать проекции в двух и трехмерные подпространства. Связь результатов наблюдений с переменными состояниями и модельными уравнениями в общем случае осложнена еще и шумами. Например, для одномерного отображения $x_{n+1} = F(x_n + \xi_n, c)$ и $u_n = x_n + \zeta_n$, где ξ_n — динамический шум (т.е. влияющий на динамику системы), а ζ_n — измерительный шум (т.е. влияющий на результаты измерений), точное решение задачи о нахождении вектора параметров $\vec{c}$ возможно

лишь в идеальном случае $\xi_n = \zeta_n = 0$, что в реальных исследованиях является практически нереализуемым сценарием.

Лишенным указанных недостатков и одним из наиболее интересных современных методов являются рекуррентные диаграммы, получившие в последнее десятилетие широкое теоретическое развитие и практическое признание. Метод основан на фундаментальном свойстве динамических систем, отмеченном еще в конце 19-го века выдающимся французским математиком Анри Пуанкаре, и сформулированном в виде теоремы рекуррентности: «Если система сводит свою динамику к ограниченному подмножеству фазового пространства, то система почти наверняка, т.е. с вероятностью, практически равной единице, сколь угодно близко возвращается к какому-либо изначально заданному режиму».

Рекуррентное поведение - периодичность или иррегулярная цикличность, свойственно не только природным системам, но и сложным системам, созданным человеком. Рекуррентность (повторяемость) состояний в смысле прохождения позднего участка траектории в фазовом пространстве достаточно близко к предыдущему, является фундаментальным свойством диссипативных динамических систем.

Идея реконструкции аттрактора опирается на теорему Такенса (Takens, 1971), с помощью которой можно восстановить фазовое пространство аттрактора системы и составить представление о динамике всей системы по изменению одной переменной.

Пусть задана динамическая система (ДС) $\phi^t(x)$ с фазовым пространством M . M – компактное d -мерное многообразие ($\dim M = d$). Предположим, что числа, образующие временной ряд, являются значениями некоторой наблюдаемой – скалярной функции состояния ДС $x(t)$: $x_i = h(x(t_i))$ и представляют собой последовательность измеренных мгновенных значений переменной $x(t)$. Тогда, можно отобразить данную последовательность в m -мерное пространство так, чтобы каждое значение данного временного ряда $x(t_i)$ отображалось в точку этого пространства с координатами $\{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)\}$. Данное m -мерное пространство назовем пространством вложения, а множество точек, моделирующее исходный аттрактор, – *восстановленным аттрактором*.

Пусть временной шаг между элементами временного ряда равен τ , а вектора $x(t_i)$ будем обозначать x_i . Тогда

$$x_{i+1} = \varphi^\tau(x_i), x_{i+2} = \varphi^{2\tau}(x_i), \dots, x_{i+m-1} = \varphi^{(m-1)\tau}(x_i).$$

Построим вектора $z_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}\}$, где

$$x_i = h(x_i),$$

$$x_{i+1} = h(x_{i+1}) = h(\varphi^\tau(x_i)),$$

$$x_{i+2} = h(x_{i+2}) = h(\varphi^{2\tau}(x_i)),$$

...

$$x_{i+m-1} = h(x_{i+m-1}) = h(\varphi^{(m-1)\tau}(x_i)).$$

Все компоненты вектора z_i связаны с одним и тем же состоянием ДС x_i . Тогда, существует такая вектор-функция V , которая отображает вектора x_i в точки m -мерного пространства R^m , $z_i = V(x_i)$, $x_i \in M$, $z_i \in R^m$.

Теорема Такенса утверждает, что типичным свойством отображения V будет то, что при $m \geq 2d+1$ оно будет давать вложение M в R^m .

Образ M в R^m обозначим S : $S = V(M)$.

Согласно теореме, в типичном случае у него не должно быть самопересечений. Функция V имеет обратную V^{-1} , определенную на S . Каждой траектории ДС соответствует ее образ в z пространстве. Причем образы имеют те же свойства, что и исходные траектории. На S можно определить динамическую систему.

$$x_i = V^{-1}(z_i), x_{i+1} = \varphi^\tau(x_i),$$

$$z_{i+1} = V(x_{i+1}) = V(\varphi^\tau(x_i)) = V(\varphi^\tau(V^{-1}(z_i))) \equiv P(z_i).$$

P действует из S в S и не определено вне S .

Таким образом, мы имеем два отображения:

$$x_{i+1} = \varphi^\tau(x_i) \equiv \Phi(x_i), \quad \Phi: M \rightarrow M,$$

$$z_{i+1} = P(z_i), \quad P: S \rightarrow S.$$

Их можно рассматривать как отображения, связанные невырожденной заменой переменных $z = V(x)$. Характеристики, инвариантные относительно такой замены, у систем должны совпадать. К ним, в частности, относится корреляционная размерность, которую можно определить по экспериментальным данным, не зная всех переменных динамической системы. Свойства S и $P(z)$ зависят от ди-

намической системы φ , наблюдаемой функции h , задержки τ и размерности вложения m .

Метод Гроссбергера – Прокаччиа (Grassberger, Procaccia, 1983) заключается в восстановлении аттрактора, «похожего» на исходный, последовательным сдвигом на величину τ . Для оценки размерности вложения последовательно получают новые размерности и измеряют некоторую характеристику получившегося многомерного ряда. После некоторого значения эта величина перестает увеличиваться, что говорит о достижении размерности вложения. В качестве проверки достижения требуемой размерности в нашем случае используется корреляционный интеграл $C(\varepsilon)$.

Корреляционный интеграл (корреляционный показатель) – это вероятность того, что временной ряд содержит пару точек, расстояние между которыми не превышает ε . Вычисление корреляционного интеграла производится по формуле: $C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i \neq j} \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|)$, где

$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$ – функция Хэвисайда; N – число наблюдений, ε – расстояние, x_i, x_j – элементы выборки. Корреляционной размерностью называется величина $D_c = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\varepsilon)}{\log \varepsilon}$. Оценить D_c можно путем линейной аппроксимации. При малых ε , $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{C(\varepsilon)}{\varepsilon^{D_c}} \approx \varepsilon^{D_c}$, отсюда,

$$\log C(\varepsilon) = D_c \log \varepsilon + \text{const}, \quad D_c = \frac{\log C(\varepsilon) - \text{const}}{\log \varepsilon}.$$

Корреляционный интеграл можно рассчитывать и для точек в исходном фазовом пространстве x_i , и для реконструированных векторов z_i . Во втором случае корреляционная размерность становится функцией не только от ε , но и от параметров реконструкции m и τ .

Зависимость от двух последних параметров позволяет диагностировать хаотичность, уровень шума, время предсказуемости.

Как уже отмечалось, практическая реализация идей реконструкции часто сталкивается, с одной стороны, с проблемой ограниченности временного ряда, с другой стороны, с проблемой стационарности исследуемого объекта.

Например, ЭЭГ которую снимают длительное время, не является стационарным процессом. Требование стационарности процесса можно считать практически соблюденным в пределах участка ЭЭГ продолжительностью до 1с.

В дальнейших исследованиях, предложенные в 1987-м году Экманом (Eckmann), Кампхорстом (Kamphorst) и Рюэлем (Ruelle) рекуррентные диаграммы, основаны на этом фундаментальном свойстве, и позволяют отобразить фазовую траекторию любой размерности на двумерную двоичную квадратную матрицу, размер которой определяется длиной временного ряда, через свойство рекуррентности. Помимо визуальных возможностей, существует метод количественного анализа структур, формируемых на изображении рекуррентной диаграммы. Современные исследования показали, что рекуррентная диаграмма содержит всю необходимую информацию о динамике системы. Работы ученых, как Джо Збилут (Joe Zbilut), Норберт Марван (Norbert Marwan), Марко Тиль (Marco Thiel), Кармен Романо (Carmen Romano) и других, существенно обогатили возможности данного метода за последнее десятилетие. Начиная с 2005-го года, регулярно проводятся международные конференции по рекуррентному анализу. Несмотря на достаточно высокий интерес к этому методу со стороны зарубежных ученых (количество публикаций по его применению в научной деятельности составляет сотни работ), его применение довольно редко встречается в отечественной научной и технической практике. Отсутствует инструментарий, который объединял бы в себе все последние достижения в области рекуррентного анализа и при этом был бы ориентирован на создание на его основе комплексов программ. Зачастую исследователь вынужден делать произвольный выбор управляющих параметров количественного анализа ввиду отсутствия оснований и критериев для их выбора. В ряде случаев исследователи допускают привлечение сторонних, не основанных на теории о рекуррентности, методов с целью попыток «реконструкции» частей диаграмм, что вносит в анализ информацию, не полученную непосредственно из исследуемых данных. Также следует отметить, что сам по себе рекуррентный анализ представляет собой богатое поле для исследований, как самого метода, так и аспектов его применения.

Рекуррентные диаграммы — нетребовательный к качеству входных данных комплексный метод анализа временных рядов, со-

вмещающий в себе визуальные возможности (диаграммы) и мощный численный аппарат (меры). Тем не менее, метод сам по себе представляет поле для исследований, в том числе изучения возможностей и особенностей применения в практике построения математических моделей. Отсутствует достаточно гибкий инструментарий для использования при построении проблемно-ориентированных программ (в частности, ориентированных на регулярное прикладное использование).

Следовательно, разработка и исследование методов и алгоритмов применения рекуррентных диаграмм на этапах математического моделирования, а также разработка гибкого инструментария, реализующего возможности метода, являются актуальными проблемами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eckman J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems// Europhysics Letters 5. – 1987. V.4. N 9. – P. 973-977.
2. Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems //Physics Reports. 2007. V.438. –P. 237 – 329.
3. Marwan N. How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis// International Journal of Bifurcation and Chaos, 2011, V.21(4), –P. 1003–1017.
4. C. Mocenni, A. Facchini, A. Vicino: Comparison of recurrence quantification methods for the analysis of temporal and spatial chaos//Mathematical and Computer Modelling, 2011, V. 53(7–8), –P. 1535–1545.
5. Shultz A., Zou Y., Marwan N., Turvey M. Local minimal-based recurrence plots for continuous dynamical systems – International Journal of Bifurcation and Chaos, 2011, V. 21, –P. 1065 – 1075.

РАСЧЁТ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ «ТВЁРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ»

Аннотация. Проведено исследование низкотемпературного трубчато-ребристого теплового аккумулятора фазового перехода «твёрдое тело – жидкость». Составлена математическая модель для расчёта основных геометрических, динамических и теплофизических параметров аккумулирующего модуля. В модели использовался приближённый квазистационарный метод расчёта скорости движения границы раздела фаз. Особенностью модели является учёт конвективной составляющей в жидкой фазе теплоаккумулирующего материала. Численное решение позволило выявить постоянство скорости движения границы раздела фаз на режиме зарядке. Определено время зарядки аккумулятора при выбранном суточном потреблении тепла.

Проведено исследование трубчато-ребристого теплоаккумулирующего модуля «твёрдое тело – жидкость» на режиме зарядки. Математическая модель базируется на инженерных методах, характерных для расчёта рекуперативных теплообменных аппаратов. Определена скорость перемещения границы раздела фаз, что позволило найти полное время зарядки теплоаккумулятора. Определены динамические и геометрические характеристики накопителя тепла.

Ключевые слова: фазовый переход «твёрдое тело – жидкость», теплоаккумулятор, теплоаккумулирующий материал, теплоноситель, численные исследования.

Вступление. Проблема аккумулирования тепла стоит особенно остро при использовании энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии, при реализации различных энергосберегающих мероприятий, в частности, в металлургической, в химической и других отраслях промышленности. Неравномерный характер поступления тепловой энергии от первичного источника и несоответствие между периодом поступления и использования тепла приво-

дит к необходимости вводить в энергетические контуры теплоаккумулирующие системы, среди которых наиболее эффективными считаются фазопереходные модули «твёрдое тело – жидкость». Такие системы достаточно надёжны и обладают значительным ресурсом работы, что связано с обратимостью процесса «плавления – затвердевания», низкой химической активностью используемых материалов, стабильным температурным уровнем, способным обеспечить множество периодов заряда и разряда аккумулятора. Теплоаккумуляторы фазового перехода «твёрдое тело – жидкость» обладают достаточно большой энергетической ёмкостью и относительно малыми размерами по сравнению с теплоёмкостными водяными или грунтовыми накопителями тепла. Что же касается более высокотехнологичных накопителей (водородных и пр.), то их разработка находится на начальных этапах и говорить об их массовом использовании пока преждевременно.

Расчёт энергетических систем, в которых осуществляется фазовый переход «твёрдое тело – жидкость» связан со значительными трудностями. Такие задачи по определению нестационарны, в них присутствуют нелинейные граничные условия, связанные как с внешним теплообменом, так и с наличием движущейся границы раздела фаз, в бесконечно малой области которой происходит выделение или поглощение скрытой теплоты. Дополнительные сложности при расчёте теплообменного оборудования с использованием теплоты фазового перехода связаны с сопряжённым характером теплообмена и цикличностью поступления теплоты от первичного источника. Такие задачи практически невозможно решить с использованием стандартных пакетов программ, а численное моделирование на основе полной системы Навье – Стокса достаточно затратно, как в интеллектуальном, так и в ресурсном аспекте [1]. Кроме того, численное решение подобных задач сложно применить в инженерной практике, особенно на этапе проектирования энергосистем, когда за короткий промежуток времени необходимо рассмотреть множество возможных конструкторских решений. Поэтому крайне важно иметь достаточно простой инструментарий для проведения инженерных расчётов, созданию которого и посвящена данная работа.

Постановка задачи. Модуль теплового аккумулятора с фазовым переходом, как правило, представляет собой трубчато – ребристый теплообменник, обеспечивающий сравнительно равномерный

прогрев теплоаккумулирующего материала (ТАМа) при невысоких температурных напорах. Такие напоры характерны для накопителей тепла, что работают в энергетическом контуре «солнечный коллектор – теплоаккумулятор – система отопления или горячего водоснабжения». На примере этого контура удобно проводить расчёт и анализ работы трубчато-ребристого теплоаккумулятора, причём результаты проведенных исследований впоследствии можно легко трансформировать на другие типы энергосистем.

Теплоаккумулирующий модуль начинает работать на режиме зарядки, только если температура на выходе из гелиоколлектора становится выше температуры фазового перехода ТАМа. В этом случае теплоноситель поступает в теплообменник и отдавать теплоту ТАМу через стенки трубок и рёбра. Граница раздела фаз в ТАМе начинает перемещаться и её положение можно определить лишь в процессе расчёта. Известно крайне мало точных решений подобных задач, класс которых носит название задачи Стефана. Причём во всех известных решениях предполагается, что передача теплоты, как в твёрдой, так и в жидкой фазах осуществляется теплопроводностью [2]. Однако, экспериментальные данные указывают на то, что существенное влияние на теплообмен в жидкой фазе ТАМа оказывает конвективная составляющая, учёт которой необходимо производить в процессе расчёта [3].

Квазистационарная математическая модель тепломассопереноса в элементе трубчато-ребристого фазопереходного аккумулятора теплоты на режиме зарядки состоит из уравнения баланса теплоты

$$-GC_P d\vartheta_{TH} = \rho_{TAM} L \cdot 4l \cdot h \frac{d\delta_{TAM}}{d\tau}, \quad (1)$$

и уравнения теплопередачи

$$-GC_P \frac{d\vartheta_{TH}}{dx} = K\vartheta_{TH} \cdot 4l. \quad (2)$$

В этих уравнениях в качестве избыточной температуры выступает $\vartheta_{TH} = T_{TH} - T_{\Phi}$; G и C_P – расход теплоносителя и его теплоёмкость; ρ_{TAM} и L – плотность и скрытая теплота фазового перехода ТАМа; l , h и δ_{TAM} – расстояние между каналами в теплоаккумуляторе, высота накопителя и толщина жидкой фазы соответственно.

Система уравнений (1) – (2) должна быть дополнена граничными и начальными условиями, которые в нашем случае имеют вид

$$\text{при } \tau = 0 \quad \delta_{TAM} = \delta_{TAMH}, \quad x = 0 \quad \vartheta_{TH} = \delta_{THH}. \quad (3)$$

Решая дифференциального уравнения (2) при заданных граничных условиях и подставляя полученный результат в уравнение (1), получим

$$-GC_P \vartheta_{TH1} (1 - e^{\frac{KF}{GC_P}}) = \rho_{TAM} L \cdot 4l \cdot h \cdot \varepsilon_{Cp} \frac{d\delta_{TAM}}{d\tau}, \quad (4)$$

где F – это площадь поверхности ребёр, приходящаяся на один канал.

Величина ε_{Cp} учитывает расход теплоты на подогрев, образовавшийся в процессе зарядки, жидкой фазы. Проведённые оценочные расчёты показывают, что при зарядке теплоаккумулятора от ГЖ данная величина находится в пределах 1,01–1,03 и ею можно пренебрегать в дальнейшем.

В уравнении (4) неизвестной остаётся величина коэффициента теплопередачи, которая на режиме зарядки принимает значение

$$K = \frac{1}{\frac{F}{\alpha_{TH} \pi dh} + \frac{1}{\alpha_{ЭKB} \xi}}, \quad (5)$$

Значение среднего коэффициента теплоотдачи между теплоносителем и стенкой канала α_{TH} находим из критериального уравнения М.А. Михеева в предположении, что в канале организован ламинарный режим течения теплоносителя, а эквивалентный коэффициент теплоотдачи от ребер к поверхности раздела фаз $\alpha_{ЭKB}$ из соображений ключевого влияния на теплообмен конвективной составляющей в жидкой фазе. Коэффициент ξ в уравнении (5) характеризует неравномерность распределения температуры по длине ребра. В [2] приведено аналитическое решение характера изменения температуры по ребру при отсутствии теплоотдачи с торцов. Используя это решения, и, переходя к среднеинтегральному значению избыточной температу-

ры, получаем $\xi = \frac{1}{1 + \frac{2}{3}(ml)^2}$, где $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{ЭKB}}{\lambda_P \cdot \delta_P}}$.

В замкнутом объёме жидкой фазы развивается свободная конвекция, учёт которой связан со значительными вычислительными трудностями. Объём жидкой фазы изменяется неравномерно, поэтому для инженерных расчётов достаточно рассмотреть некоторую среднюю прослойку с жидкой фазой, причём с условием, что поверхность фазового перехода при своём перемещении будет все время оставаться параллельной поверхности ребёр. Тогда учёт свободной конвекции можно проводить аналогично процессу теплопроводности с использованием специально безразмерного коэффициента $\varepsilon_K = f(Cr \cdot Pr)$, который находится из критериального уравнения [4]. Для нашего случая выражение для эквивалентного коэффициента теплоотдачи будет иметь вид

$$\alpha_{ЭKB} = 0,18 \lambda_{\Phi} \left(\frac{g \cdot \beta_{\Phi}}{\nu_{\Phi}^2} Pr_{\Phi} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\nu_{TH}}{\delta_{TAM}} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Подставляя значение $\alpha_{ЭKB}$, ξ и F в выражение (5) при двух продольных рёбрах на стенках канала, получим значение коэффициента теплопередачи на режиме зарядки в виде

$$K = \frac{1}{\frac{l}{\pi \lambda_{TH}} + \frac{1}{\alpha_{ЭKB}} + \frac{4}{3} \frac{l^2}{\lambda_P \delta_P}}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (4), получаем дифференциальное уравнение для определения скорости движения границы раздела фаз при зарядке аккумулятора.

Метод решения и анализ полученных результатов. Полученное дифференциальное уравнение (4) с начальными условиями (3) решить аналитически не представляется возможным. Среди численных методов решений обыкновенных дифференциальных уравнений наибольшим порядком точности обладает метод Рунге – Кутта, который и был положен в основу численного алгоритма.

Отдельно при проведении исследования рассматривался вопрос определения расхода теплоносителя в теплоаккумулирующем модуле. Он решался в предположении, что модуль входит в систему горячего водоснабжения, заряжается от ГК и при отсутствии солнечной радиации обеспечивает систему теплом в течении нескольких суток. Сначала теплоноситель поступает в теплообменник модуля, охлаждается там до температуры, близкой к температуре фазового перехода, а по-

том, направляется в бак – аккумулятор, где охлаждаться до температуры t_c . Расход теплоносителя можно рассчитать, используя значения этой температуры

$$G = \frac{K_{ГК} \cdot F_{ГК}}{C_p \ln \frac{t_M - t_{БА}}{t_M - t_{БКЛ}}}, \quad (8)$$

где $K_{ГК}$ и $F_{ГК}$ – коэффициент тепловых потерь гелиоколлектора и его площадь, $t_{БКЛ}$ – температура теплоносителя при включении ГК, а t_M – максимальная температура в ГК при отсутствии расхода, зависящая от совершенства ГК, интенсивности солнечной радиации и прочих метеоусловий [5].

Циркуляция теплоносителя в контуре начинается по достижению определённой температуры $t_{БКЛ}$, что позволяет определить время работы гелиоколлектора, которое в июне месяце на широте Днепропетровска не превосходит 6 часов.

Поставляя полученные значения расхода в уравнение (4) и учитывая максимальное время работы системы, получаем суточную зависимость толщины расплавленной фазы в теплоаккумулирующем модуле. Эта зависимость представлена на рис.1.

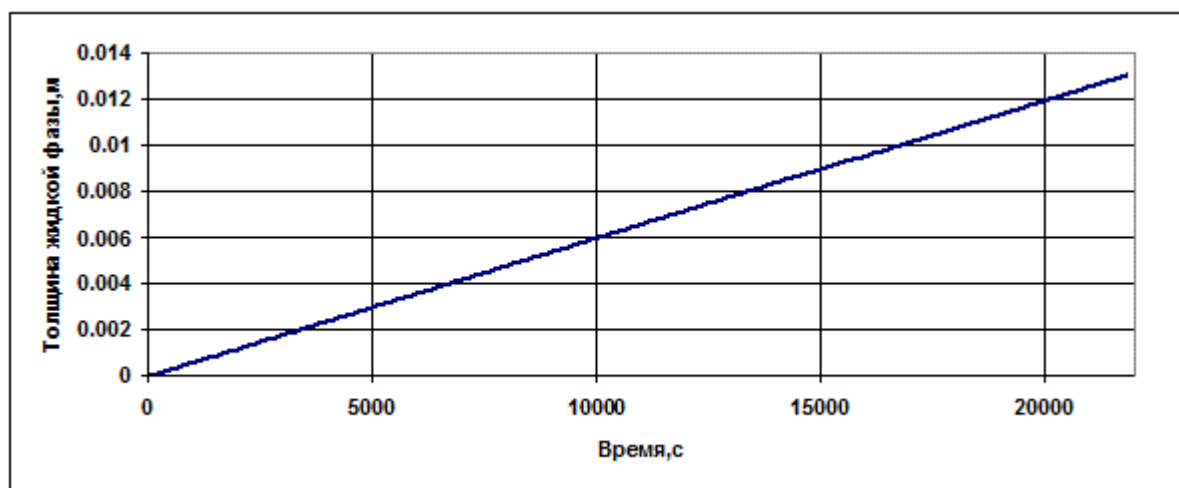


Рисунок 1 - Суточное изменение толщины жидкой фазы ТАМа

Анализ графика показывает линейную зависимость изменения толщины расплавленной фазы от времени. Очевидно, это связано со слабым влиянием на процесс эквивалентного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ЭКВ}$, в выражение для которого величина $\delta_{ТАМ}$ входит в степе-

ни 0,25. Таким образом, можно утверждать, что на режиме зарядке скорость перемещения границы раздела фаз остается постоянной и равной $3,1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$.

Следует отметить, что исследования проводились для теплоаккумулятора, заправленного очищенным парафином, а в качестве теплоносителя выступал антифриз. Геометрические параметры модуля вычислялись из соображений обеспечения горячей водой предполагаемого потребителя из расчёта 300 кг/сутки. Длина каналов с теплоносителем выбиралась равной 1м, количество трубок в каждом теплопроводящем ряду 10 и таких рядов тоже 10. При такой геометрии полная зарядка аккумулятора произойдёт через 8,4 суток.

Выводы. Исследование трубчато-ребристого теплоаккумулятора фазового перехода «твёрдое тело – жидкость» базировались на созданной квазистационарной математической модели, в которой учитывался конвективный теплоперенос в жидкой фазе ТАМа. Проведенные на основе созданного алгоритма численные исследования показали постоянство скорости движения границы раздела фаз на режиме разрядке, определено также среднее значение этой скорости. Это позволило вычислить полное время зарядки накопителя тепла при выбранных геометрических и динамических параметрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кныш Л.И. Оптимизация геометрических и динамических характеристик теплоаккумулирующего модуля / Л.И. Кныш, А.А. Рядно. // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №6 – С. 9 –15.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967.– с. 600.
3. Ho C. –J. Heat Transfer During Melting from an Isothermal Vertical Wall / C. – J. Ho, R. Viskonta // J. Heat Transfer. – 1984, V. 106. – P. 12 – 19.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия. – 1977. – с. 345.
5. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – с. 420.

В.Ф. Миргород, Е.В. Деренг, И.М. Гвоздева
**ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРЕНДОВОЙ КОМПОНЕНТЫ
ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ**

Аннотация. В работе обосновывается подход к интервальной оценке трендовой компоненты временных рядов, образованных параметрами регистрации состояния силовых и энергетических установок в их длительной эксплуатации. Для многомерных массивов данных последовательно используются известные методы сингулярного спектрального и трендового анализа. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет превалирующее собственное значение, предложена интервальная оценка трендовой компоненты. Установлены свойства матрицы автокорреляции временного ряда. Решена задача интервальной оценки трендовой компоненты для временного ряда с линейным трендом.

Ключевые слова: временной ряд, статистическая модель, трендовый анализ, корреляционная матрица, интервальная оценка

Введение. Повышение надежности статистических выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов является основной проблемой как для теории, так и для практики применения систем технической диагностики (СТД). Ее решение достигается на основе использования и развития методов трендового анализа временных рядов, образуемых регистрируемыми параметрами (измеряемыми переменными состояниями и выходными переменными).

Задача выделения трендов в указанных временных рядах, установления их интервальных оценок на заданном уровне значимости имеет важное научно-прикладное значение, в частности, применительно к СТД силовых и энергетических установок на основе газотурбинных двигателей (ГТД), как общепромышленного, так и авиационного назначения.

Основная часть. Предметом исследования являются статистические модели (СМ) порождения данных, методы трендового анализа, позволяющие установить закономерности развития трендовой компо-

ненты и ее доверительные интервалы [2,4,6].

Известные методы трендового контроля [4,6] позволяют установить лишь факт отсутствия тренда на заданном уровне значимости, поскольку именно так формулируется опорная гипотеза [9]. Опыт их применения свидетельствует о недопустимо высоком уровне ошибок как первого, так и второго рода. Методы трендового анализа, позволяющие непосредственно выделить трендовую компоненту временного ряда, дают возможность повысить надежность статистических выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов. Однако зачастую объем выборки не является значительным, применяемые статистики являются выборочными, поэтому остается нерешенным вопрос об уровне значимости выделенной трендовой компоненты и доверительных интервалах ее оценки.

Целью настоящего исследования является обоснование подхода к интервальной оценке трендовой компоненты временного ряда, образованного совокупностью отклонений параметров регистрации состояния объекта диагностирования от его СМ, и установления уровня ее статистической значимости.

Центральной гипотезой исследования является предположение о том, что в процессе эксплуатации сложных энергетических объектов происходит постепенная и естественная деградация их характеристик, что неизбежно приводит к наличию в регистрируемых данных долговременного тренда параметров. Поэтому только отклонение от СМ позволяет получить информацию о техническом состоянии объекта. Подчиненная гипотеза состоит в том, что повышение надежности статистических выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов достигается путем интервальной оценки трендовой компоненты на заданном уровне значимости.

Следуя методу “Гусеница” [3], полная информация об изменении временного ряда содержится в траекторной матрице X_t размером $n \times k$ [3]:

$$\begin{aligned}
\vec{x}_1 &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \\
\vec{x}_2 &= [x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{n+1}] \\
&\dots \\
\vec{x}_k &= [x_k \ x_{k+1} \ \dots \ x_{n+k-1}]
\end{aligned}
\tag{1}$$

В качестве СМ порождения данных предлагается следующая модель совокупности трендовой и шумовой компонент [6, 7]:

$$\vec{x}_k = [x_k \ x_{k+1} \ x_{k+2} \ \dots \ x_{k+n-1}] = \vec{x}_{tr} + \vec{x}_{noise}. \tag{2}$$

Задача анализа выборки данных (1) состоит в разделении ее строк в виде (2) на заданном уровне значимости. Решение указанной задачи достигается последовательной реализацией следующих этапов:

1. Выполняется решение задачи на собственные значения

$$X_t X_t^T \vec{u}_i = \lambda_i \vec{u}_i, \tag{3}$$

где столбцы $\vec{u}_i$ образуют матрицу U из ортогональных векторов матрицы $X_t X_t^T$.

2. Определяется [1,5] матрица главных компонент временного ряда

$$F = U^T X_t, \tag{4}$$

где ее строки упорядочены по убыванию собственных чисел матрицы $X_t X_t^T$.

3. Выполняется разложение строк матрицы (1) по главным компонентам (4)

$$\vec{x}_s = \sum_{i=1}^k b_{si} \vec{f}_i, \tag{5}$$

где $s = \overline{1, k}$, b_{si} – коэффициенты влияния, определяемые решением переопределенной ($n > k$) системы линейных алгебраических уравнений:

$$F^T \vec{b}_s = \vec{x}_s. \tag{6}$$

4. Отыскивается решение (6) с использованием псевдообратной матрицы [5]:

$$\vec{b}_s^T = (FF^T)^{-1} F \vec{x}_s^T. \tag{7}$$

Так как $(FF^T) = \text{diag}\{\lambda_i\}$, $i = \overline{1, k}$, то из (7) следует

$$b_{sj} = \bar{x}_s \bar{f}_j^T / (\bar{f}_j \bar{f}_j^T) = \lambda_j^{-1} \bar{x}_s \bar{f}_j^T, \quad (8)$$

где $\bar{f}_j$ – строки матрицы главных компонент. Если собственное число $\lambda_1 = \lambda_{\max}$ соответствует трендовой компоненте, то согласно (8), получаем

$$\bar{x}_{tr,s} = b_{s1} \bar{f}_1, \quad (9)$$

После выделения трендовой компоненты (9) выполняется установление статистических свойств остатка $\bar{x}_{noise}$. Если остаточный временной ряд удовлетворяет критериям принадлежности выборки из генеральной совокупности нормально распределенных случайных величин на заданном уровне значимости, то разделение ряда (2) выполнено корректно. Если при этом СКО остаточной выборки не превышает погрешностей измерений, то разделение ряда соответствует физическим особенностям процессов.

Как свидетельствует опыт практического применения [6,7,8] рассмотренного подхода выделения трендовой компоненты временного ряда, если в ряде присутствует статистически значимый тренд, то он связывается с максимальным собственным числом матрицы автокорреляций $X_t X_t^T$, которое существенно превосходит остальные собственные числа. В связи с этим может быть предложена гипотеза, что такое условие (существенное различие первого собственного значения от всех иных) может полагаться собственно условием наличия статистически значимого тренда в выборке.

Для подтверждения предлагаемой гипотезы и установления условий ее применения первоначально рассмотрим следующую Лемму.

Лемма. Если элементы r_{ij} матрицы R таковы, что

$$\begin{aligned} r_{ii} &= 1, i = 1, k, \\ r_{ij} &= r, i \neq j, \end{aligned}$$

то ее собственные значения имеют вид:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1 + (k-1)r, \\ \lambda_i &= 1 - r, \end{aligned}$$

а элементы первого собственного вектора $\bar{u}_1$, соответствующего первому собственному значению, равны друг другу: $u_{11} = u_{12} = u_{13} \dots = u_{1k}$.

Следствие. Если выполнено условие нормировки $\vec{u}_1 \vec{u}_1^T = 1$, то элементы первого собственного вектора $\vec{u}_1$, соответствующего первому собственному значению, равны

$$u_{11} = u_{12} = u_{13} \dots = u_{1k} = 1/\sqrt{k}.$$

Доказательство Леммы. Для доказательства рассмотрим уравнение $\det(\lambda E - R) = 0$ и установим, что в условиях Леммы справедливы следующие равенства

$$\begin{aligned} SpR &= \sum_{i=1}^k \lambda_i, \\ \det R &= \prod_{i=1}^k \lambda_i. \end{aligned}$$

Очевидно, что первое условие выполняется:

$$SpR = \sum_{i=1}^k \lambda_i = \lambda_1 + (k-1)\lambda_i = 1 + (k-1)r + (r-1)(1-r) = k.$$

Второе условие означает, что

$$\det R = \prod_{i=1}^k \lambda_i = [1 + (k-1)r](1-r)^{k-1}. \quad (10)$$

Вычтем из второй строки матрицы R первую, из третьей – вторую и т.д. В результате получим следующую матрицу

$$\begin{bmatrix} r-1 & 1-r & 0 & 0 \dots & 0 \\ 0 & r-1 & 1-r & 0 \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ r & r & r & r \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Определитель матрицы при этом не изменится. В полученной матрице прибавим все ее столбцы к первому:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1-r & 0 & 0 \dots & 0 \\ 0 & r-1 & 1-r & 0 \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ 1+(k-1)r & r & r & r \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Раскрывая определитель полученной матрицы по первому столбцу, получим окончательно:

$$\det R = [1 + (k-1)r](1-r)^{k-1},$$

что полностью совпадает с выражением (10).

Так как сумма элементов любой из строк матрицы R равна первому собственному числу, то элементы первого собственного вектора $\vec{u}_1$, соответствующего первому собственному значению, равны друг другу. Лемма доказана.

Утверждение. Пусть задан временной ряд и его траекторная матрица (1). Если траекторная матрица удовлетворяет гипотезе о равнокоррелированности ее строк, то первая центрированная компонента (9) временного ряда по первой главной компоненте является скользящим средним этого ряда.

Такая гипотеза опровергается на заданном уровне значимости распределения χ^2 решающей статистикой коррелированности признаков (строк траекторной матрицы). Если, кроме того, шумовая компонента удовлетворяет условиям выборки из генеральной совокупности независимых нормально распределенных случайных величин, то доверительный интервал трендовой компоненты определяется интервальной оценкой среднего.

Если нормированная матрица автокорреляций $X_t X_t^T$ не принадлежит классу матриц R , но есть основания предполагать статистическую обоснованность такого предположения, то следует воспользоваться известной [1] статистикой коррелированности признаков.

Гипотеза коррелированности (нормированная матрица автокорреляций $X_t X_t^T$ принадлежит классу матриц R) опровергается при выполнении условия:

$$\zeta = (A - BC)(n-1)/(1-r)^2 > \chi^2(\alpha, N), \quad (11)$$

где α - уровень значимости,

$N = (k+1)(k-1)/2$ - число степеней свободы,

$$A = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k (r_{ij} - r)^2,$$

$$B = \left(\sum_{i=1}^k (r_i - r)^2 \right),$$

$$C = r(2-r)(k-1)^2 / [k - (k-2)(1-r)^2],$$

$$r = \left(\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k r_{ij} \right) / (k(k-1)),$$

$$r_i = \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^k (r_j) \right) / (k-1),$$

r_{ij} - элементы нормированной матрицы автокорреляций $X_t X_t^T$.

Как показывает опыт практического применения, статистика (11) отвечает реальным временным рядам, если средний строчный коэффициент корреляции близок к 1 (как это имеет место в примере, рассмотренном в [1]), или к 0 (некоррелированность ряда, т.е. отсутствие тренда). В том случае, когда средний строчный коэффициент корреляции имеет промежуточное значение, может быть использован тест Стьюдента равенства средних применительно к строкам нормированной матрицы автокорреляций.

Для оценки условий применимости предлагаемого подхода выполнено тестовое компьютерное моделирование. Компьютерный эксперимент по численной оценке достоверности теоретических выводов заключался в том, что генерировался временной ряд по закону

$$w = (-0.5:0.005:0.585); \quad wd = -0.5 * w; \quad w1 = wd + 0.1 * \text{randn}(1, 218)$$

и выполнялась оценка тренда для десяти независимых реализаций длиной 198 отчетов каждая, с окном в 20 отсчетов, двумя методами в сопоставлении с интервальной оценкой. Результаты компьютерного эксперимента приведены на рис. 1 и рис. 2. Интервалы скользящего среднего установлены на уровне доверительной вероятности 0,95. Как это следует из результатов обработки данных компьютерного эксперимента и видно на иллюстрациях, интервальная оценка тренда является статистически достоверной на заданном уровне значимости.

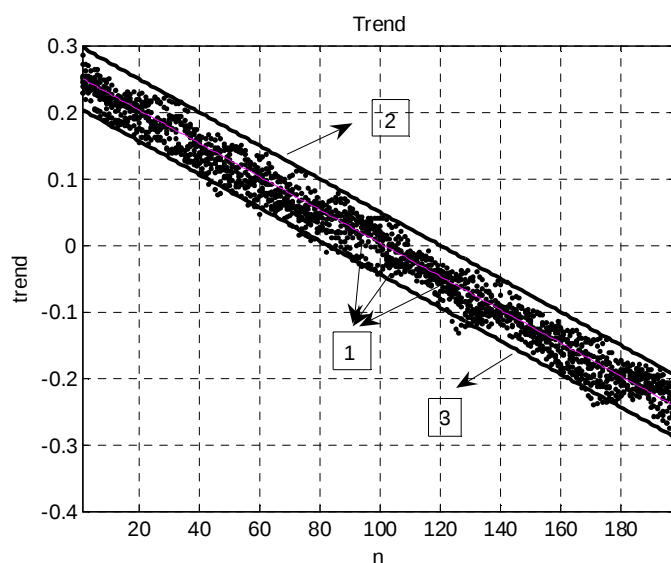


Рисунок 1 – Интервальная оценка тренда методом SSA:

1 – тренды, 2 – верхний доверительный интервал,
3 – нижний доверительный интервал

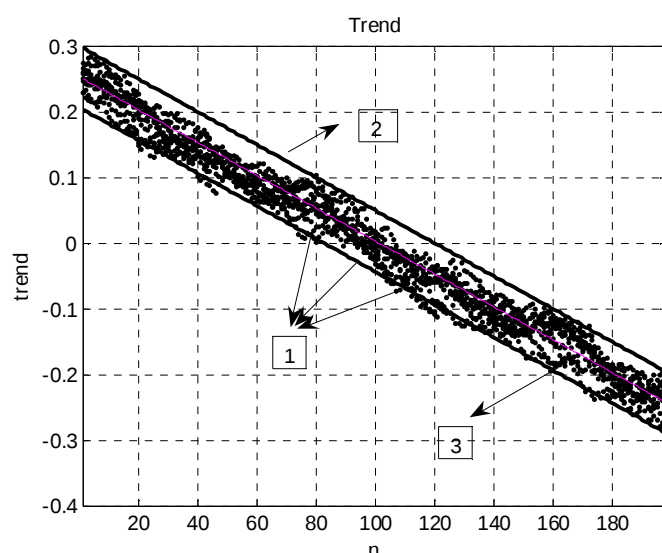


Рисунок 2 – Интервальная оценка тренда методом скользящего сред-

него: 1 – тренды, 2 – верхний доверительный интервал,

3 – нижний доверительный интервал

Заключение. Последовательное сочетание методов выделения трендовой компоненты и вероятностной оценки ее доверительных интервалов позволяет расширить признаковое пространство принятия решений и, тем самым, повысить надежность диагностических выводов о техническом состоянии сложных энергетических объектов. Такое расширение возможно на основе формирования многомерных массивов из данных регистрации технического состояния исследуемо-

го объекта и их аппроксимации методом главных компонент. Для временных рядов, матрица автокорреляции которых имеет преобладающее собственное значение, может быть найдена интервальная оценка трендовой компоненты.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов прогноза интервальной оценки трендов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсон – М.: Мир, 1989. – 540 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница” [Текст] / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. – С.-П. ун-т. – 1997.
4. Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. // – К.: Техника, 1998. – 312 с.
5. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С.Л. Марпл мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Миргород В.Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко, В.М. Кравченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – 9(56) – С. 192-197.
7. Миргород В.Ф. Трендовый анализ на основе диагностических параллелепипедов [Текст] / В.Ф. Миргород, И.М. Гвоздева // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ. – Вип. 3(80). – 2012. – С. 97-104.
8. Деренг Е.В. Комбинированный метод ТАТ обработки многомерных временных рядов [Текст] / Е.В. Деренг, И.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ. – 2013. – Вип. 4(87). – С. 21-27.
9. Perron P. Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Further Evidence from a New Approach [Text] / P. Perron. – *Journal of Economic Dynamic and Control*. – No. 12. – P. 297-332.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Показана возможность комбинированного использования натурного эксперимента и математического моделирования в решении теплофизических задач. Для определения коэффициента теплопроводности водоугольного топлива использована комбинация метода сравнения и численного решения обратной задачи теплопроводности. В качестве метода численного решения обратной задачи теплопроводности был выбран метод многократного решения прямой задачи теплопроводности с оптимизацией итераций методом золотого сечения.

Результаты определения значений коэффициента теплопроводности образцов водоугольных топлив предложенным методом в диапазоне изменения температуры 40-150 оС показали, что коэффициент теплопроводности водоугольных топлив изменяется от 0,41 до 0,82 Вт/м·К в зависимости от марки исходного угля, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, водоугольное топливо, экспериментальная установка, математическое моделирование

Введение

По своим теплофизическим, теплотехническим, реологическим и электрическим свойствам водоугольное топливо - вид топлива, характеристики которого существенно отличаются от характеристик составляющих его веществ [1-4]. От теплофизических свойств топлива зависит выбор технологических решений, конструкций установок и агрегатов, показатели энергопотребления, режимы эксплуатации. С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольного топлива и их изменение в ходе термической переработки, так как этими свойствами, в значительной степени, оп-

ределяются продолжительность, технологические параметры и энергетическая эффективность процесса. Поскольку при приготовлении водоугольного топлива можно использовать различные виды углей и отходов углеобогащения, механизм переноса теплоты и теплофизические свойства получаемых топлив весьма разнообразны [5-7].

Постановка задачи и цели исследований

Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольного топлива от различных параметров затруднительно из-за отсутствия физической модели, адекватной реальной структуре водоугольного топлива. Это является следствием специфических физико-химических свойств дисперсных систем, сложности структуры угля и видоизменения воды в слоях, прилегающих к поверхности частиц, а также поверхностных слоев самих частиц по сравнению со структурой исходного угля.

Физические экспериментальные методы определения коэффициента теплопроводности дают достаточно точные результаты, но при этом требуют значительных ресурсных и временных затрат, кроме того, возникают трудности с технической реализацией граничных условий, обусловленных теорией метода.

Существенно менее затратными являются методы определения теплофизических свойств материалов с помощью математического моделирования. Однако, в ходе математического моделирования приходится сталкиваться с недостатком информации, характеризующей различные физические параметры процесса. В связи с этим применяют обобщенные аналитические выражения и критериальные зависимости, описывающие тепловые процессы, что неизбежно приводит к отклонению математической модели от реального объекта моделирования, а, как следствие, приводит к существенным погрешностям при определении теплофизических свойств.

Поэтому в настоящее время достаточно актуальной задачей является разработка более совершенных методов определения коэффициентов теплопроводности, обеспечивающих простоту реализации, высокую точность и достаточное быстроедействие. Одним из эффективных методов определения коэффициента теплопроводности является использование комбинации физического эксперимента и математического моделирования.

При проведении физического эксперимента предлагается использовать метод сравнения, различные вариации которого описаны в [5].

В качестве метода численного моделирования использовано решение обратной задачи теплопроводности путем многократного решения прямой задачи теплопроводности. При этом недостающая информация по граничным условиям, физическим параметрам и условиям протекания реального теплового процесса, определяется непосредственно в ходе проведения экспериментальных исследований на эталонном веществе и в последующем используется при математическом моделировании.

Методика исследований и анализ полученных результатов

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив на базе кафедры промышленной теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины разработана экспериментальная установка. Экспериментальная установка состоит из измерительного участка и системы управляющих и регистрирующих приборов. Схема измерительного участка экспериментальной установки представлена на рис. 1.

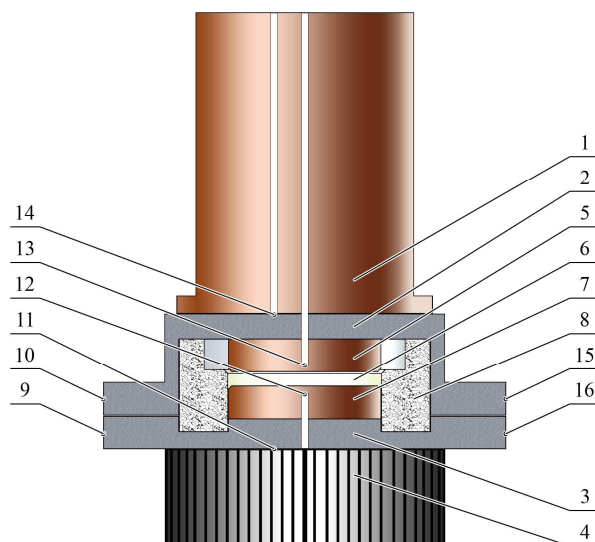


Рисунок 1 - Схема измерительного участка экспериментальной установки для определения теплофизических свойств водоугольного топлива: 1 – нагреватель; 2 – верхняя часть корпуса; 3 – нижняя часть корпуса; 4 - охладитель; 5 – верхний термодиск; 6 – нижний термодиск; 7 – отсек для водоугольного топлива; 8 – фторопластовая вставка; 9-16 – термопары

Измерительный участок состоит из нагревателя 1, верхней 2, нижней 3 частей корпуса, выполненных из нержавеющей стали, и охладителя 4. Нагреватель выполнен из нихромовой проволоки, намотанной на массивный медный цилиндр, который теплоизолирован со всех сторон, кроме нижней части, контактирующей с верхней частью корпуса (теплоизоляция на рис. 1 не показана). Верхняя часть корпуса 2 соединена с верхним термодиском 5, изготовленным из меди, и представляет собой неразбираемую в процессе эксплуатации конструкцию. Нижняя часть корпуса соединена с нижним термодиском 6, также выполненным из меди. Для уменьшения потерь теплоты через корпус отсек для водоугольного топлива 7 и прилегающие к нему поверхности изолированы фторопластовой вставкой 8. В верхней и нижней частях корпуса установлены термодиски 9-16. Для исследований использованы хромель-алюмелевые термодиски температурный диапазон измерения, согласно ДСТУ 2837-94 составляет от -270°C до $+1372^{\circ}\text{C}$, и для которых выполнена индивидуальная тарировка, обеспечивающая высокую точность измерения температур ($\pm 0,01^{\circ}\text{C}$). В собранном виде конструкция является герметичной и выдерживает давление до 3 МПа.

Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки для определения теплофизических свойств водоугольного топлива представлена на рис. 2.

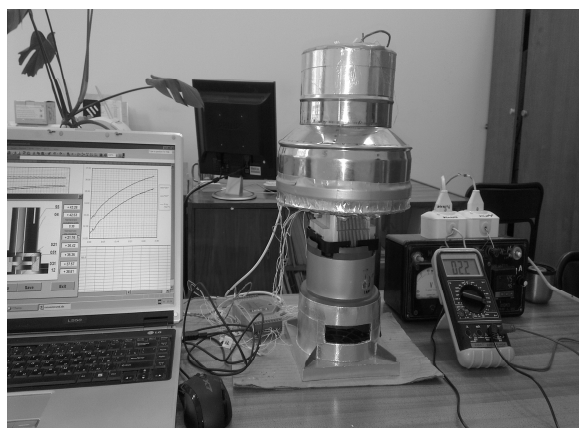
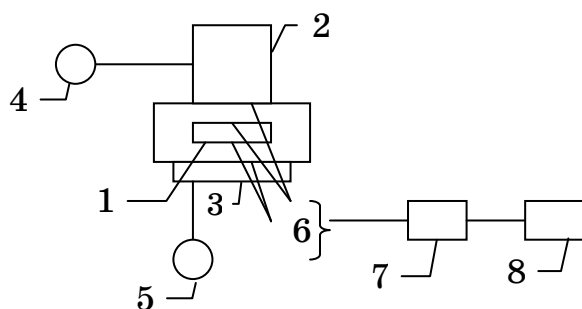


Рисунок 2 - Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки для определения теплофизических свойств водоугольного топлива: 1 – отсек для водоугольного топлива; 2 – нагреватель; 3 – охладитель; 4 - регулятор мощности; 5 – регулятор скорости вращения; 6 – термодиски; 7 - аппаратно-измерительный комплекс; 8 – компьютер

Опытный образец водоугольного топлива объемом 25 мл помещается в специальный отсек 1. Тепловой поток, выделяемый нагревателем 2, проходит через опытный образец топлива и воспринимается охладителем 3. Мощность нагревателя регулируется с помощью регулятора 4 (максимальная мощность нагревателя составляет 300 Вт). Высокая теплопроводность корпуса нагревателя и наличие термодиска, изготовленного из меди, обеспечивают равномерное распределение температуры по поверхности, контактирующей с водоугольным топливом. Опытный образец водоугольного топлива плотно, без воздушных зазоров, прилегает к поверхностям верхней и нижней части корпуса. Охладитель 3 представляет собой вентилятор, прикрепленный к нижней поверхности корпуса и имеющий возможность регулирования скорости вращения регулятором 5, что обеспечивает возможность выравнивания и поддержания необходимой температуры на охлаждаемой поверхности. Показания термопар 6 передаются на аппаратно-измерительный комплекс 7, который позволяет контролировать, обрабатывать и выводить на экран компьютера 8 значения параметров в режиме реального времени. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольного топлива и позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья (марки угля, количества минеральных примесей и водной фазы, крупности частиц и проч.).

Для определения коэффициента теплопроводности из полученного экспериментального распределения температур необходимо выполнить решение обратной задачи теплопроводности. В качестве метода численного решения обратной задачи теплопроводности был выбран метод многократного решения прямой задачи теплопроводности [8] с оптимизацией итераций методом золотого сечения [9]. В качестве функции, для которой методом золотого сечения находился минимум, использовалось значение среднего абсолютного отклонения расчетных и измеренных температур в контрольных точках.

Уравнение теплопроводности, описывающее перенос теплоты в рассматриваемой экспериментальной установке, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(a \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{a}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где t – температура, °C:

τ - время, с;

r - радиус-вектор, м;

z - аппликата, м;

a – коэффициент температуропроводности $a = f(t, z, r)$, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, $\lambda = f(t, r, z)$, $\text{В}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

ρ - плотность вещества $\rho = f(t, r, z)$, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_v - изохорная теплоемкость единицы массы $c = f(t, r, z)$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Для полного математического описания всех частных особенностей переноса теплоты в рассматриваемой экспериментальной установке сформулированы начальные и граничные условия I, II, III и IV рода.

Приведенное дифференциальное уравнение теплопроводности (1) с учетом граничных условий решалось методом прогонки, который хорошо известен и является достаточно эффективным численным методом решения подобных задач [10]. Расчеты проводились до достижения стационарного режима.

Для реализации метода прогонки дифференциальное уравнение теплопроводности (1) и граничные условия приводятся к дискретному виду, где вместо производных используются их конечно-разностные аппроксимации. Вся область решения представляется в виде совокупности узлов расчетной сетки. После выполнения дискретизации получается система линейных алгебраических уравнений для определения локальной температуры в каждом узле сетки.

Для аппроксимации дифференциального уравнения теплопроводности (1) вводится пространственно-временная сетка с координатами:

$$r_i = (i-1) \cdot \Delta r; \quad z_j = (j-1) \cdot \Delta z; \quad t_n = n \cdot \tau \quad (3)$$

где i – номер узла сетки по координате r ,

j – номер узла сетки по координате z ,

n – номер шага по времени τ

Рассматриваемая сетка представлена на рис.3

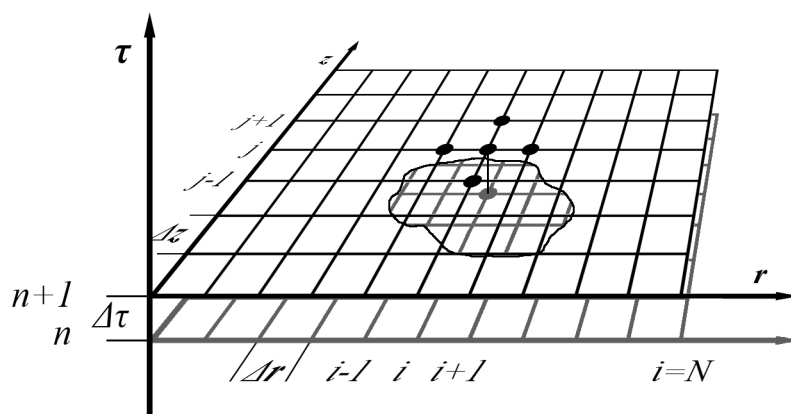


Рисунок 3 - Пространственно-временная сетка

Аппроксимация уравнения (1) выполняется на основе локально одномерной схемы по рекомендациям [10]. Эта схема является неявной, абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации. В основу подхода положена разбивка целого шага по времени на два этапа. На промежуточном временном полушаге проводится дискретизация двумерного дифференциального уравнения (6) только по r , в результате чего получается одномерное уравнение. В результате его решения находится промежуточное значение температуры $t^{n+1/2}$

Затем выполняется дискретизация уравнения (1) по z , в результате чего также получается одномерное уравнение, после решения которого рассчитывается значение температуры на целом шаге по времени. За исходную температуру на этом этапе расчета принимается полученное промежуточное значение температуры. Схема вычислений на промежуточном шаге по времени представлена на рис. 4.

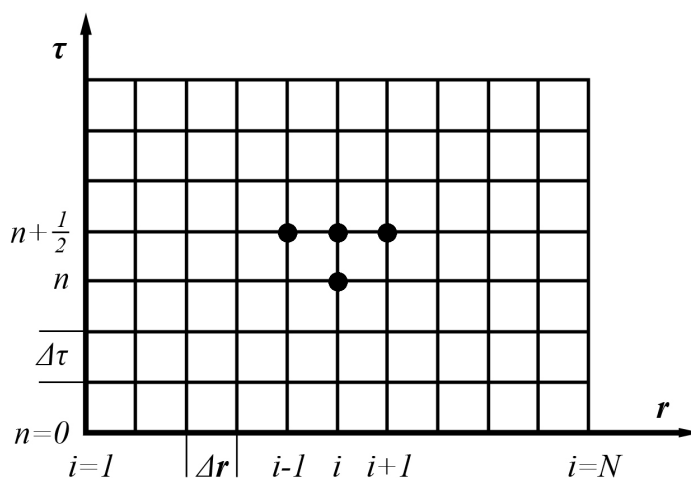


Рисунок 4 - Схема вычислений на промежуточном шаге по времени

При построении алгоритма использовалась ортогональная равномерная расчетная сетка с шагом 0,5 мм по обеим координатам. Геометрические размеры расчетной схемы соответствовали размерам экспериментальной установки. Численное интегрирование по времени осуществлялось с шагом $\Delta t = 3$ с, который определен в процессе тестовых расчетов.

По результатам физического эксперимента на эталонном веществе (дистиллированная вода) и решении обратной задачи теплопроводности определялись граничные условия, физические параметры и условия протекания реального теплового процесса. Полученные экспериментальные данные на эталонном веществе использовались для проверки адекватности разработанной математической модели по определению коэффициента теплопроводности. Расхождение полученных данных с известными значениями коэффициента теплопроводности воды при различных температурах составило 1-3 %.

Следующим этапом проведения исследований являлось проведение физического эксперимента на исследуемом веществе (водоугольном топливе) в условиях эксперимента, подобных условиям эксперимента на эталонном веществе. В процессе эксперимента фиксировалось распределение температурных полей. В процессе численного моделирования воспроизводились условия проведения эксперимента на водоугольном топливе, и распределение нестационарных температурных полей рассчитывалось многократно до момента достижения стационарного режима. При этом предварительно задавалось некоторое значение коэффициента теплопроводности водоугольного топлива. Из полученного стационарного распределения температур выбирались значения температур в точках, соответствующих точкам установки термопар в экспериментальной установке. Расчетные и экспериментальные значения сравнивались, если отличие между ними превышало заданную погрешность, значение коэффициента теплопроводности изменялось, и расчет повторялся.

Таким образом, в результате многократных расчетов прямой задачи теплопроводности для каждого экспериментально измеренного распределения температур получены значения коэффициентов теплопроводности водоугольного топлива из различных марок угля.

Результаты определения значений коэффициентов теплопроводности образцов водоугольных топлив предложенным методом ком-

бинирования физического эксперимента и математического моделирования в диапазоне изменения температуры 40-150 °С приведены на рис. 5.

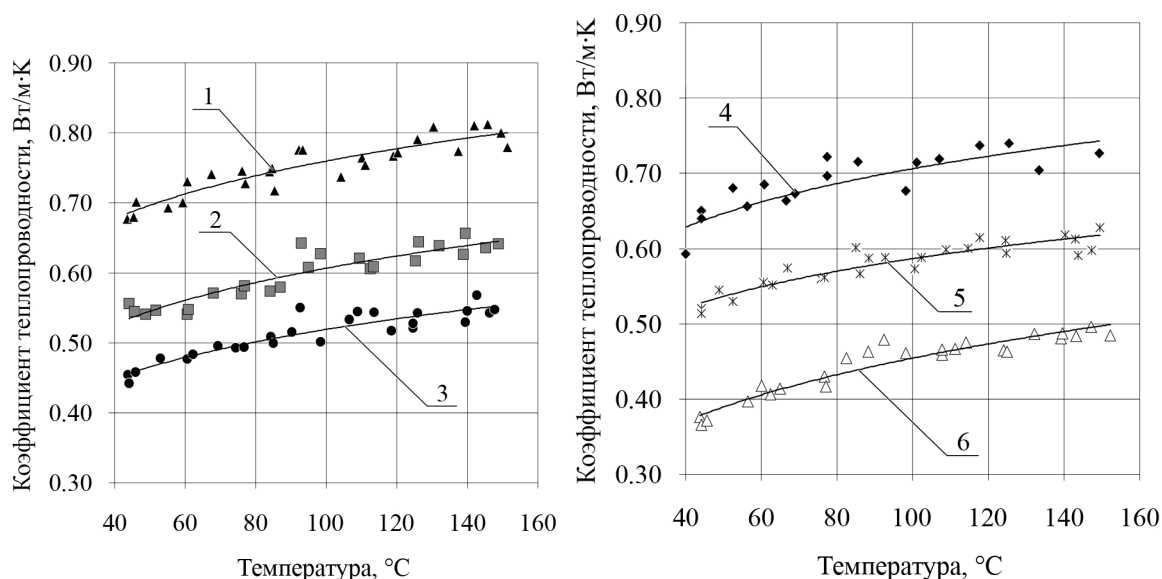


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для водоугольных топлив, полученных из углей различных марок: 1- водоугольное топливо из антрацита; 2 - водоугольное топливо из длиннопламенного угля; 3- водоугольное топливо из бурого угля; 4 - водоугольное топливо из газового угля; 5 - водоугольное топливо из жирного угля; 6 - водоугольное топливо из тощего угля

Как видно, коэффициент теплопроводности водоугольного топлива существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,81 Вт/м·К, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне. Практическое применение полученных результатов исследования теплофизических свойств водоугольных топлив может быть непосредственно связано с моделированием теплообменных процессов горения и газификации [11], а также проектированием энергетического оборудования для термической переработки водоугольных топлив.

Выводы

С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольных топлив и их изменение в ходе термической переработки. Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольного топлива от различных парамет-

ров затруднительно из-за отсутствия физической модели, адекватной реальной структуре водоугольного топлива.

Одним из эффективных методов определения коэффициента теплопроводности является использование комбинации физического эксперимента и математического моделирования. При проведении физического эксперимента предлагается использовать метод сравнения. В качестве метода численного решения обратной задачи теплопроводности был выбран метод многократного решения прямой задачи теплопроводности с оптимизацией итераций методом золотого сечения. При этом недостающая информация по граничным условиям, физическим параметрам и условиям протекания реального теплового процесса, определяется непосредственно в ходе проведения экспериментальных исследований на эталонном веществе, и в последующем используется при математическом моделировании.

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив разработана экспериментальная установка. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольного топлива, позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья.

Результаты определения значений коэффициента теплопроводности образцов водоугольных топлив предложенным методом комбинирования физического эксперимента и математического моделирования в диапазоне изменения температуры 40-150 °С показали, что коэффициент теплопроводности водоугольных топлив существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,82 Вт/м·К в зависимости от марки исходного угля, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинчук В.А. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии / В.А. Пинчук, М.В. Губинский, Б.Б. Потапов // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ : «Нова ідеологія». - 2009. – Випуск 1 (16). - С. 144 - 149.
2. Пинчук В.А. Исследование электрических свойств водоугольных суспензий / В.А. Пинчук, А.М. Должанский // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: Збірник наукових праць. – Випуск 5. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія. - 2013. – с. 171-180.
3. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007.- № 1. - С. 35 - 45.
4. Макаров А.С. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность / А.С. Макаров., А.И. Егурнов, С.Д. Борул // Хімічна промисловість України. – 2007. - № 2 (79). – С. 56 - 60.
5. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. - М.: Машиностроение, 1957. – 172 с.
6. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - М.: Энергия, 1977. - 344 с.
7. Агроскин А.А. Теплофизика твердого топлива / А.А. Агроскин. - М.: Недра, 1980. – 256 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: «Высшая школа», 1967. - 599 с.
9. Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова / Учеб. пособие для вузов - М.: Наука, 1978. - 351 с.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
11. Пинчук В.А. Исследование и разработка режимов газификации водоугольного топлива / В.А Пинчук, Т.А. Шарабура // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Випуск № 3 (5) – Киев : «НПВК Триакон». – 2010. - С.192-195.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ДЛЯ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
АВТОРЕГРЕССИОННЫХ УРАВНЕНИЙ**

Аннотация. Исследована итерационная процедура метода параметрической идентификации для задач моделирования объектов с многомерным выходом в классе систем авторегрессионных уравнений, в которых случайные аддитивные составляющие в выходных переменных, как в законе функционирования, так и в модели наблюдения объекта, могут быть статистически зависимы, а множества входных переменных в уравнениях могут быть различными. Эффективность итерационной процедуры подтверждена методом статистических испытаний.

Ключевые слова: задача структурно-параметрической идентификации.

Моделирование в классе систем авторегрессионных уравнений является распространенным подходом в технических задачах управления и научных исследованиях. Возникающая при этом задача оценивания коэффициентов в системе авторегрессионных уравнений имеет особенность, которая состоит в том, что регрессоры в моделях этого класса содержат случайную составляющую (errors-in-variables problem). В этих условиях вместо обычного метода наименьших квадратов (МНК) необходимо применять обобщённый (ОМНК) с ковариационной матрицей оценивания Σ_{ξ} специального вида (total least squares). Конструирование ковариационной матрицы в конкретных условиях той или иной задачи, её зависимость от неизвестных параметров авторегрессионных уравнений и необходимость итерационного уточнения приводит к различным алгоритмам оценивания [1–7].

В данной работе методом статистических испытаний исследуется итерационная процедура для оценивания коэффициентов в одном классе систем авторегрессионных уравнений [8–9], в которых множества входных переменных в уравнениях могут быть различными, а случайные аддитивные составляющие в выходных переменных могут

быть статистически зависимы как в модели функционирования, так и в модели наблюдения.

1. Рассматриваемый класс систем авторегрессионных уравнений

Пусть функционирование динамического объекта подчиняется закону в виде системы авторегрессионных уравнений

$$\begin{pmatrix} * \\ x_1(k) \\ * \\ x_2(k) \\ \vdots \\ * \\ x_i(k) \\ \vdots \\ * \\ x_n(k) \end{pmatrix} = \sum_{q=1}^h \begin{bmatrix} * & * & \cdots & * \\ x_0(q) & x_{-1}(q) & \cdots & x_{1-p}(q) \\ * & * & \cdots & * \\ x_1(q) & x_0(q) & \cdots & x_{2-p}(q) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & \cdots & * \\ x_{i-1}(q) & x_{i-2}(q) & \cdots & x_{i-p}(q) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & \cdots & * \\ x_{n-1}(q) & x_{n-2}(q) & \cdots & x_{n-p}(q) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_1(k, q) \\ 0 \\ \theta_2(k, q) \\ \vdots \\ 0 \\ \theta_p(k, q) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \zeta_0(k) \\ \zeta_1(k) \\ \vdots \\ \zeta_{i-1}(k) \\ \vdots \\ \zeta_{n-1}(k) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

которую в матрично-векторной форме можно записать в виде:

$$* \mathbf{x}(k) = \sum_{q=1}^h \mathbf{Z}(-p; q) \overset{0}{\boldsymbol{\theta}}(k, q) + \zeta(-1; k), \quad k = 1, 2, \dots, h, \quad (2)$$

где $* \mathbf{x}(k)$ – ненаблюдаемый $(n \times 1)$ -вектор значений k -й выходной переменной объекта в дискретные моменты времени $t = t_i$, $i = 1, 2, \dots, n$; n – общее число наблюдений за объектом; p – число предыдущих значений выходных переменных, которые влияют на их текущее значение; $* \mathbf{Z}(-p; q)$ – $(n \times p)$ -матрица p предыдущих ненаблюдаемых значений q -й переменной, $q = 1, 2, \dots, h$, в обозначении этой матрицы -1 означает тот факт, что в (1)–(2) при формировании величины $* x_i(k)$ участвуют величины $(x_{i-1}(q), x_{i-2}(q), \dots, x_{i-p}(q))$; h – число выходных переменных, образующих множество X ; $\overset{0}{\boldsymbol{\theta}}(k, q)$ – $(p \times 1)$ -вектор неизвестных детерминированных, не зависящих от времени коэффициентов; $\zeta(-1; k)$ – ненаблюдаемый случайный $(n \times 1)$ -вектор, в обозначении которого -1 означает, что в (1)–(2) при формировании величины $x_i(k)$ аддитивно участвует величина $\zeta_{i-1}(k)$.

В (1)–(2) предполагается, что в формировании текущего значения k -й выходной переменной участвуют все p предыдущих значений всех h выходных переменных объекта. В общем же случае не все

переменные и не все предыдущие значения переменных могут участвовать в этом формировании. Для формализации записи моделей в таком общем случае введем в рассмотрение структурные матрицы, смысл которых проиллюстрируем на конкретном примере. Пусть на текущее значение выходной переменной с номером k влияют первое, второе и четвертое предыдущие значения переменной с номером q из заданного максимально возможного числа влияющих предыдущих значений $p=5$. Тогда вместо матрицы $\overset{*}{Z}(-p;q)$ в системе авторегрессионных уравнений

(1)–(2) следует записать произведение матриц

$$\overset{*}{Z}(-p;q)S(k,q) =$$

$$= \begin{bmatrix} \begin{array}{c|c|c|c|c} * & * & * & * & * \\ x_0(q) & x_{-1}(q) & x_{-2}(q) & x_{-3}(q) & x_{-4}(q) \\ \hline * & * & * & * & * \\ x_1(q) & x_0(q) & x_{-1}(q) & x_{-2}(q) & x_{-3}(q) \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * & * & * \\ x_{i-1}(q) & x_{i-2}(q) & x_{i-3}(q) & x_{i-4}(q) & x_{i-5}(q) \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * & * & * \\ x_{n-1}(q) & x_{n-2}(q) & x_{n-3}(q) & x_{n-4}(q) & x_{n-5}(q) \end{array} & \begin{array}{c|c|c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c|c|c} * & * & * \\ x_0(q) & x_{-1}(q) & x_{-3}(q) \\ \hline * & * & * \\ x_1(q) & x_0(q) & x_{-2}(q) \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * \\ x_{i-1}(q) & x_{i-2}(q) & x_{i-4}(q) \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * \\ x_{n-1}(q) & x_{n-2}(q) & x_{n-4}(q) \end{array} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где (5×3) -матрица $S(k,q)$ представляет собой структурную матрицу, отражающую влияние первого, второго и четвертого предыдущих значений переменной с номером q на текущее значение переменной состояния с номером k . Априорная информация о значении p и о том, какие именно предыдущие значения каждой из переменных определяют текущие значения выходных переменных в законе функционирования объекта (1)–(2), представляется совокупностью структурных матриц $S(k,q)$, $k,q=1,2,\dots,h$, которые могут быть различными для разных выходных переменных. В дальнейшем будем предполагать, что эти структурные матрицы заданы.

С учетом введенных структурных матриц закон функционирования (2) для общего случая формирования выходных переменных можно записать

$$\overset{*}{\mathbf{x}}(k) = \sum_{q=1}^h \overset{*}{Z}(-p;q)S(k,q)\overset{o}{\boldsymbol{\theta}}(k,q) + \zeta(-1;k) = \overset{=}{\mathbf{x}}(k) + \zeta(-1;k), \quad k=1,2,\dots,h, \quad (4)$$

где $\overset{o}{\boldsymbol{\theta}}(k,q)$ – $(m(k,q) \times 1)$ -вектор неизвестных детерминированных коэффициентов; $m(k,q)$ – число столбцов в матрице $S(k,q)$;

$m(k,1)+m(k,2)+\dots+m(k,k)+\dots+m(k,h)=m(k)$ – общее число неизвестных коэффициентов в модели для выходной переменной с номером k ;
 $\mathbf{x}(k)$ – ненаблюдаемая составляющая $(n \times 1)$ -вектора значений k -й переменной.

Пусть для наблюдений k -й выходной переменной объекта выполняется

$$x_i(k) = x_i^*(k) + \varepsilon_i(k), \quad i=1,2,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,h, \quad (5)$$

где $x_i(k)$ – наблюдаемое значение k -й переменной, измеренное в момент времени $t=t_i$, $i=1,2,\dots,n$; $x_i^*(k)$ – ненаблюдаемое значение k -й переменной; $\varepsilon_i(k)$ – случайная ненаблюдаемая ошибка измерения k -й переменной.

С учетом (5) модель наблюдения объекта в векторной форме имеет вид

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}^*(k) + \boldsymbol{\varepsilon}(k), \quad k=1,2,\dots,h. \quad (6)$$

Пусть реализации случайных величин $\zeta_i(-1;k)$ и $\varepsilon_i(k)$, $i=1,2,\dots,n$, между наблюдениями статистически независимы, и для них выполняется:

$$E\{\boldsymbol{\zeta}(-1)\} = \mathbf{O}_{(n \times h)},$$

$$E\{[\boldsymbol{\zeta}(-1)]^T \boldsymbol{\zeta}(-1)\} = n \begin{bmatrix} \sigma_{\zeta}(1,1) & \sigma_{\zeta}(1,1) & \dots & \sigma_{\zeta}(1,h) \\ \sigma_{\zeta}(2,1) & \sigma_{\zeta}(2,2) & \dots & \sigma_{\zeta}(2,h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\zeta}(h,1) & \sigma_{\zeta}(h,2) & \dots & \sigma_{\zeta}(h,h) \end{bmatrix} = n \boldsymbol{\Sigma}_{\zeta}; \quad (7)$$

$$E\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \mathbf{O}_{(n \times h)}, \quad E\{\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon}\} = n \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon}(1,1) & \sigma_{\varepsilon}(1,1) & \dots & \sigma_{\varepsilon}(1,h) \\ \sigma_{\varepsilon}(2,1) & \sigma_{\varepsilon}(2,2) & \dots & \sigma_{\varepsilon}(2,h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\varepsilon}(h,1) & \sigma_{\varepsilon}(h,2) & \dots & \sigma_{\varepsilon}(h,h) \end{bmatrix} = n \boldsymbol{\Sigma}_{\varepsilon}, \quad (8)$$

$$E\{\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\zeta}(-1)\} = \mathbf{O}_{(h \times h)}, \quad (9)$$

где $\mathbf{O}_{(n \times h)}$ – нулевая $(n \times h)$ -матрица; $\boldsymbol{\Sigma}_{\zeta}$, $\boldsymbol{\Sigma}_{\varepsilon}$ – ковариационные $(h \times h)$ -матрицы в модели функционирования и модели наблюдения объекта соответственно.

Пусть в результате наблюдения объекта в моменты времени $t = t_i$, $i = 1-2p, 2-2p, \dots, -p, 1-p, 2-p, \dots, 0, 1, 2, \dots, n$, получена $((n+2p) \times h)$ -матрица

$$\begin{bmatrix} x_{1-2p}(1) & x_{1-2p}(2) & \dots & x_{1-2p}(h) \\ x_{2-2p}(1) & x_{2-2p}(2) & \dots & x_{2-2p}(h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{-p}(1) & x_{-p}(2) & \dots & x_{-p}(h) \\ \hline x_{1-p}(1) & x_{1-p}(2) & \dots & x_{1-p}(h) \\ x_{2-p}(1) & x_{2-p}(2) & \dots & x_{2-p}(h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_0(1) & x_0(2) & \dots & x_0(h) \\ \hline x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(h) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(-1) \\ \hline \mathbf{X}(0) \\ \hline \mathbf{X} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Результаты наблюдения (10) выходных переменных X объекта (1)–(9) используются при оценивании неизвестных $m(k, q)$ -векторов коэффициентов $\overset{o}{\theta}(k, q)$, $k, q = 1, 2, \dots, h$.

2. Результаты исследования на основе модельных экспериментов

Для оценивания коэффициентов разработана итерационная процедура [9], которая исследуется ниже с помощью метода статистических испытаний. В каждом испытании с помощью датчика случайных чисел имитировались "наблюдения" объекта из класса (1)–(10) при следующих значениях параметров системы моделей: $h = 3$, $m(1) = 3$, $m(2) = 4$, $m(3) = 4$, $n = 300$, $p = 9$. Первые p "наблюдений" объекта в (10) – $x_i(k)$, $i = 1-2p, 2-2p, \dots, -p$, $k = 1, 2, 3$ (т. е. элементы матрицы $\mathbf{X}(-1)$ в (10)) формировались с помощью датчика независимых случайных чисел с заданным математическим ожиданием и единичным среднеквадратическим отклонением: $x_i(k) \sim N(\mu(k); \sigma^2)$, где $\sigma = 1,0$, $\mu(1) = 40,0$, $\mu(2) = 60,0$, $\mu(3) = 80,0$. "Наблюдения" $x_i(k)$, $i = 1-p, 2-p, \dots, n$, $k = 1, 2, 3$ (т. е. элементы матриц $\mathbf{X}(0)$ и $\mathbf{X}$ в (10)) формировались в соответствии с моделью функционирования объекта (11) и моделью наблюдения объекта (12):

$$\begin{cases} x_i(1) = +0,97 \overset{*}{x_{i-1}(1)} - 0,05 \overset{*}{x_{i-9}(1)} + 0,05 \overset{*}{x_{i-4}(2)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(1)} = \overset{=}{x_i(1)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(1)}, \\ x_i(2) = -0,05 \overset{*}{x_{i-3}(1)} + 0,97 \overset{*}{x_{i-1}(2)} - 0,05 \overset{*}{x_{i-7}(2)} + 0,10 \overset{*}{x_{i-5}(3)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(2)} = \overset{=}{x_i(2)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(2)}, \\ x_i(3) = -0,05 \overset{*}{x_{i-4}(1)} - 0,05 \overset{*}{x_{i-6}(2)} + 0,97 \overset{*}{x_{i-1}(3)} + 0,08 \overset{*}{x_{i-5}(3)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(3)} = \overset{=}{x_i(3)} + \overset{=}{\zeta_{i-1}(3)}, \end{cases} \quad (11)$$

$$x_i(1) = \overset{*}{x_i(1)} + \varepsilon_i(1), \quad x_i(2) = \overset{*}{x_i(2)} + \varepsilon_i(2), \quad x_i(3) = \overset{*}{x_i(3)} + \varepsilon_i(3). \quad (12)$$

В (11) и (12) реализации случайных ненаблюдаемых величин $\zeta_{i-1}(k)$ и случайных ненаблюдаемых ошибок измерения $\varepsilon_i(k)$ формировались по известному в методе Монте-Карло способу перехода от набора независимых случайных $(n \times 1)$ -векторов $\tilde{\eta}(q)$, $q=1,2,3$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией к набору зависимых случайных $(n \times 1)$ -векторов $\eta(q)$, $q=1,2,3$ с требуемой ковариационной матрицей Σ_η :

$$[\eta(1), \eta(2), \eta(3)] = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \tilde{\eta}(1), \tilde{\eta}(2), \tilde{\eta}(3) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $\mathbf{H}$ – нижняя треугольная матрица в разложении матрицы Σ_η : $\Sigma_\eta = \mathbf{H}\mathbf{H}^T$.

Набор независимых случайных $(n \times 1)$ -векторов $\tilde{\eta}(q)$, $q=1,2,3$ формировался с помощью датчика независимых случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и единичным среднеквадратическим отклонением, т. е. $\tilde{\eta}(q) \sim N(\mathbf{0}, \sigma_\eta^2 \mathbf{I}_n)$, $\sigma_\eta = 1,0$. Ковариационные матрицы Σ_ζ и Σ_ε формировались следующим образом: задавались корреляционные матрицы

$$\mathbf{K}_\zeta = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,4 & -0,7 \\ 0,4 & 1,0 & 0,3 \\ -0,7 & 0,3 & 1,0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,4 & 0,6 \\ 0,4 & 1,0 & -0,4 \\ 0,6 & -0,4 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

и диагональные элементы ковариационных матриц $[\Sigma_\zeta]_{qq} = \sigma_\zeta^2$, $q=1,2,3$, где $\sigma_\zeta = 0,5$, и $[\Sigma_\varepsilon]_{qq} = \sigma_\varepsilon^2$, $q=1,2,3$, где $\sigma_\varepsilon = 0,5$, а по ним однозначно рассчитывались недиагональные элементы ковариационных матриц: $[\Sigma]_{q_1, q_2} = [\mathbf{K}]_{q_1, q_2} \sqrt{[\Sigma]_{q_1, q_1} [\Sigma]_{q_2, q_2}}$, $q_1, q_2 = 1, 2, 3$ ($q_1 \neq q_2$).

Коэффициенты в модели функционирования объекта (11) считались неизвестными, и их требовалось оценить по результатам "наблюдений" $x_i(k)$, $i=1-2p, 2-2p, \dots, n$ ($n=300$), $k=1, 2, 3$. Всего в эксперименте было проведено тысячу испытаний в соответствии с (11)–(14).

В таблицах представлены результаты оценивания по МНК и по предложенной процедуре оценивания (SAD). Оценки МНК, применяемого независимо для каждого из уравнений системы, часто используются для получения начального приближения, в том числе в тех случаях, когда отсутствует априорная информация о степени статистической зависимости между аддитивными случайными составляющими в моделях функционирования и наблюдения. В данном эксперименте начальное приближение вычислялось по (63)–(69) [9]. Приведены результаты эксперимента после 2-й и 3-й итераций.

В табл. 1 представлены среднеквадратичные приближения к ненаблюдаемым (в практике) значениям выходов $\bar{x}_i(1)$, $\bar{x}_i(2)$, $\bar{x}_i(3)$ моделей, полученных по методу наименьших квадратов (МНК) и по предложенной процедуре оценивания. Требования по качеству такого приближения актуальны в задачах управления, для решения которых, как правило, строятся модели в классе систем авторегрессионных уравнений.

Качество моделей оценивалось среднеквадратичным отклонением модельных выходов $\hat{y}_i(1)$, $\hat{y}_i(2)$, $\hat{y}_i(3)$ в (58) [9] от "точных" выходов $\bar{x}_i(1)$, $\bar{x}_i(2)$, $\bar{x}_i(3)$ в (11), которые в условиях метода статистических испытаний нам известны:

$$\bar{S}_{MHK}(k) = ((n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i(k) - \hat{y}_i^{MHK}(k))^2)^{1/2}, \quad (15)$$

$$\bar{S}_{SAD}(k) = ((n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i(k) - \hat{y}_i^{SAD}(k))^2)^{1/2}, \quad k=1, 2, 3. \quad (16)$$

В соответствии с (32) и (51) в [9] для дисперсии величин $\xi_i(k) = y_i(k) - \overset{o}{y}_i(k)$, $i=1, 2, \dots, n$, $k=1, 2, 3$, выполняется

$$D\{\xi_i(k)\} = [\Sigma_\varepsilon]_{kk} + \psi_{kk}(0) + [\Sigma_\zeta]_{kk} = D(k), \quad (17)$$

и, поскольку в условиях модельного эксперимента величины $\bar{x}_i(k)$ в (11) нам известны, то для дисперсии и среднеквадратичного отклонения величин $y_i(k) - \bar{x}_i(k)$ выполняется

$$D\{y_i(k) - \bar{x}_i(k)\} = \psi_{kk}(0), \quad (18)$$

$$\bar{S}_0(y_i(k) - \bar{x}_i(k)) = (\psi_{kk}(0))^{1/2}. \quad (19)$$

Величины $\bar{S}_0\{y_i(k) - \bar{x}_i(k)\}$, $\bar{S}_{МНК}(k)$ и $\bar{S}_{SAD}(k)$ для трех моделей в системе авторегрессионных уравнений приведены в табл. 1. Эмпирические распределения двух статистик $\bar{S}_{МНК}(k)$ и $\bar{S}_{SAD}(k)$ в виде гистограмм по 1000 испытаний приведены для трех регрессионных уравнений на рис. 1.1, 1.2, 1.3, на которых гистограммы из светлых столбиков соответствуют результатам МНК-оценивания, а гистограммы из темных столбиков – результатам оценивания по разработанной процедуре.

Таблица 1

Номер уравнения	$\bar{S}_0(y_i(k) - \bar{x}_i(k))$	$\bar{S}_{МНК}(k)$	$\bar{S}_{SAD}(k)$ (после 2-й итерации)	$\bar{S}_{SAD}(k)$ (после 3-й итерации)
1	0,4865	0,4566	0,3843	0,3837
2	0,4890	0,4576	0,3869	0,3849
3	0,4881	0,4547	0,4004	0,3974

В табл. 1 приведены результаты после второй и третьей итераций. Выбор такого числа итераций обусловлен тем, что в соответствии с пробными расчетами улучшение качества системы уравнений по функционалу (76) [9] при переходе от второй итерации к третьей составляют величину, меньшую, чем

$$\delta_0^2 = 0,01(D(1) \cdot D(2) \cdot D(3))^{1/3} \approx 0,01(0,7365 \times 0,7390 \times 0,7381)^{1/3} = 0,0074. \quad (20)$$

Анализ табл. 1 и рис. 1.1–1.3 подтверждает эффективность предложенной процедуры оценивания по сравнению с обычным МНК. Описанный модельный эксперимент может послужить полигоном для тестовых испытаний других методов оценивания параметров в авторегрессионных уравнениях рассмотренного класса.

Приведем результаты второго модельного эксперимента, в котором среднеквадратичное отклонение величин $\xi(k)$, $k=1,2,3$, по сравнению с первым экспериментом увеличено в пять раз. Точнее говоря, в пять раз увеличены среднеквадратичные отклонения аддитивных случайных составляющих $\zeta_{i-1}(k)$ и $\varepsilon_i(k)$: $\sigma_\zeta = 2,5$; $\sigma_\varepsilon = 2,5$. Результаты второго эксперимента (по тысяче испытаний) представлены в табл. 2 и на рис. 2.1, 2.2, 2.3.

Таблица 2

Номер уравнения	$\bar{S}_0(y_i(k) - \hat{x}_i(k))$	$\bar{S}_{МНК}(k)$	$\bar{S}_{SAD}(k)$ (после 4-й итерации)
1	2,4314	2,2508	1,9183
2	2,4443	2,2686	1,9245
3	2,4396	2,2564	1,9863

Сравнение табл. 1 и табл. 2, а также рис. 1.1, 1.2, 1.3 и рис. 2.1, 2.2, 2.3, показывает, что показатели относительной эффективности разработанной процедуры по сравнению с МНК сохранились и во втором эксперименте.

В практических приложениях ковариационные матрицы Σ_ζ и Σ_ε , как правило, априорно неизвестны. В этом случае ковариационную матрицу Σ_ξ [9] (с учётом ее структуры!) можно оценивать итерационно по остаткам системы авторегрессионных моделей, как это сделано в итерационной процедуре [8]. В качестве начального приближения в этом случае в процедуре (58)–(77) выступают оценки обычного МНК [9].

Приведем результаты третьего модельного эксперимента, все параметры в котором совпадают с параметрами первого эксперимента, но ковариационные матрицы Σ_ζ и Σ_ε считаются неизвестными. Результаты третьего эксперимента (по тысяче испытаний) представлены в табл. 3 и на рис. 3.1, 3.2, 3.3.

Приведем результаты четвёртого модельного эксперимента, все параметры в котором совпадают с параметрами второго эксперимента, но ковариационные матрицы Σ_ζ и Σ_ε считаются неизвестными. Результаты четвёртого эксперимента (по тысяче испытаний) представлены в табл. 4 и на рис. 4.1, 4.2, 4.3.

В третьем и четвертом эксперименте использовано правило останова итерационной процедуры по факту неулучшения функционала (76) [9].

Таблица 3

Номер уравнения	$\bar{S}_0(y_i(k) - \bar{x}_i(k))$	$\bar{S}_{МНК}(k)$	$\bar{S}_{SAD}(k)$ (после 3-й итерации)
1	0,4865	0,4568	0,3861
2	0,4890	0,4570	0,3890
3	0,4881	0,4542	0,3932

Таблица 4

Номер уравнения	$\bar{S}_0(y_i(k) - \bar{x}_i(k))$	$\bar{S}_{МНК}(k)$	$\bar{S}_{SAD}(k)$ (после 3-й итерации)
1	2,4314	2,2501	1,9313
2	2,4443	2,2683	1,9465
3	2,4396	2,2564	1,9670

Сравнение табл. 3 и табл. 4, а также рис. 3.1, 3.2, 3.3 и рис. 4.1, 4.2, 4.3, показывает, что относительная эффективность разработанной процедуры по сравнению с МНК в третьем и четвертом экспериментах сохранились.

Заключение. Исследована итерационная процедура метода параметрической идентификации для задач моделирования объектов с многомерным выходом в классе систем авторегрессионных уравнений, в которых случайные аддитивные составляющие в выходных переменных, как в законе функционирования, так и в модели наблюдения объекта, могут быть статистически зависимы, а множества входных переменных в уравнениях могут быть различными. Эффективность итерационной процедуры подтверждена методом статистических испытаний.

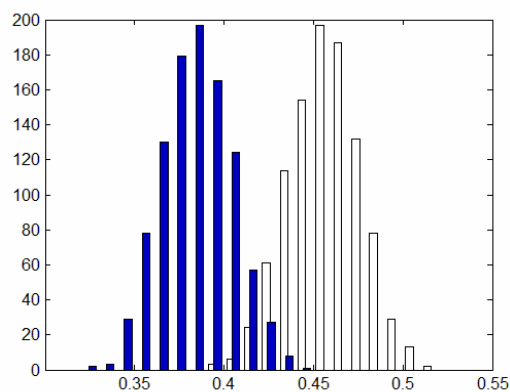


Рисунок 1.1 - Эксперимент 1,
1-е уравнение

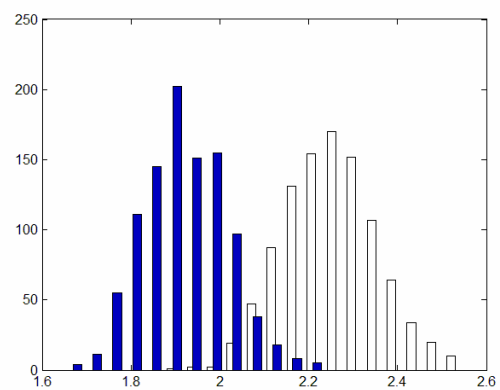


Рисунок 2.1 - Эксперимент 2,
1-е уравнение

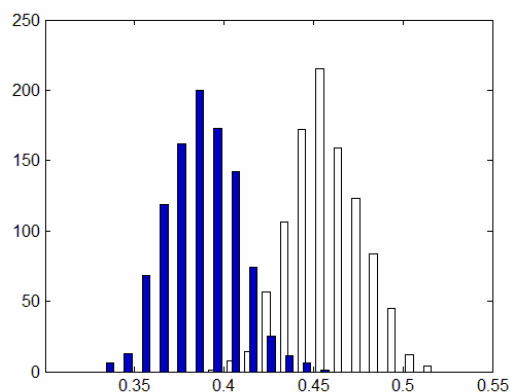


Рисунок 1.2 - Эксперимент 1,
2-е уравнение

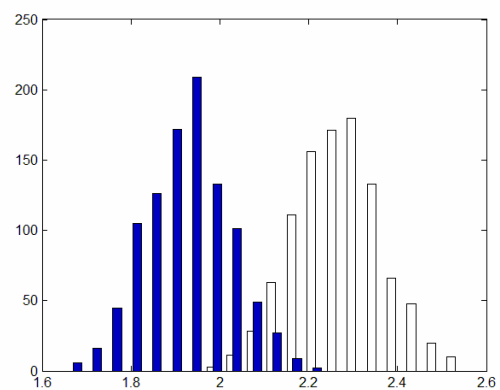


Рисунок 2.2 - Эксперимент 2,
2-е уравнение

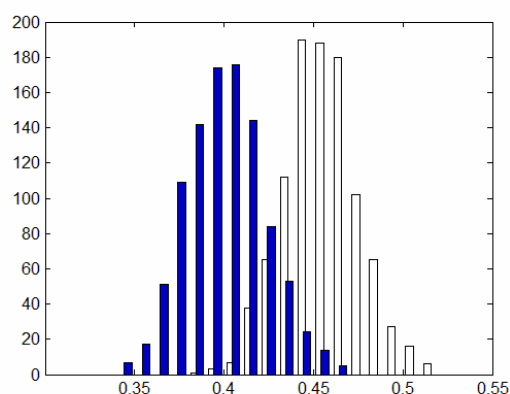


Рисунок 1.3 - Эксперимент 1,
3-е уравнение

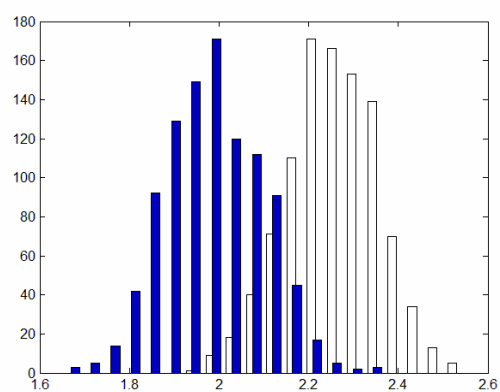


Рисунок 2.3 - Эксперимент 2,
3-е уравнение

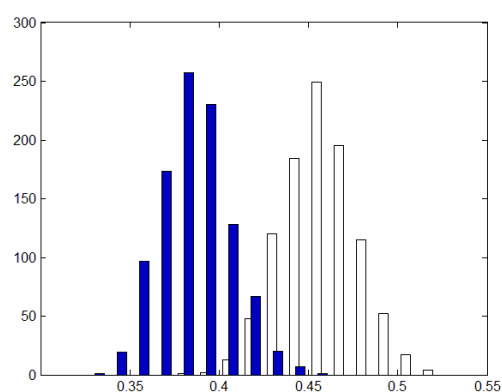


Рисунок 3.1 - Эксперимент 3,
1-е уравнение

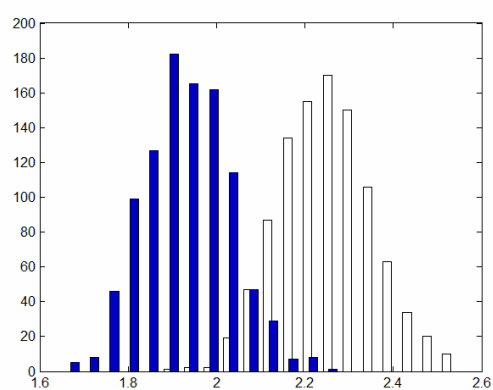


Рисунок 4.1 - Эксперимент 4,
1-е уравнение

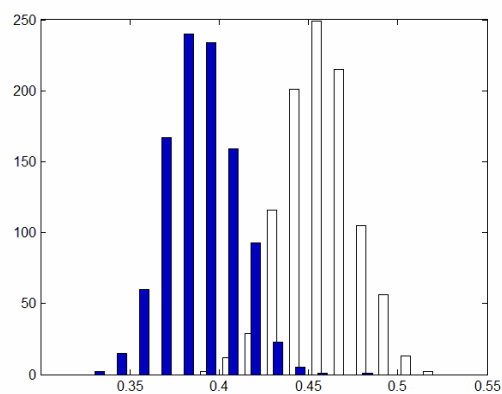


Рисунок 3.2 - Эксперимент 3,
2-е уравнение

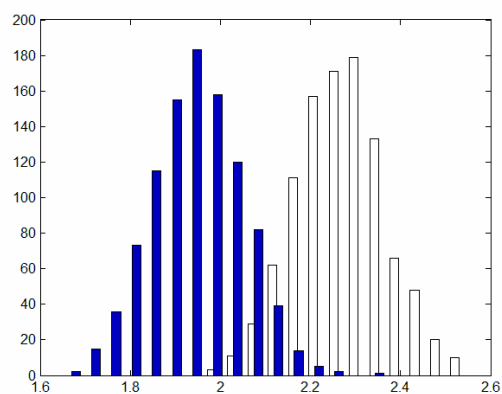


Рисунок 4.2 - Эксперимент 4,
2-е уравнение

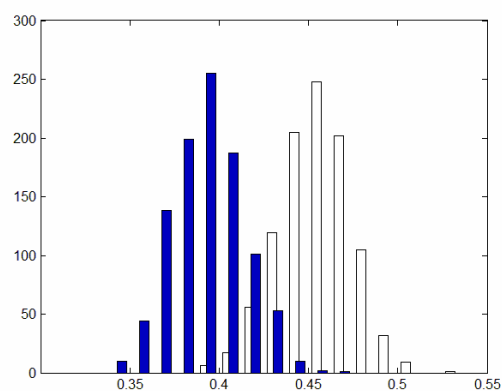


Рисунок 3.3 - Эксперимент 3,
3-е уравнение

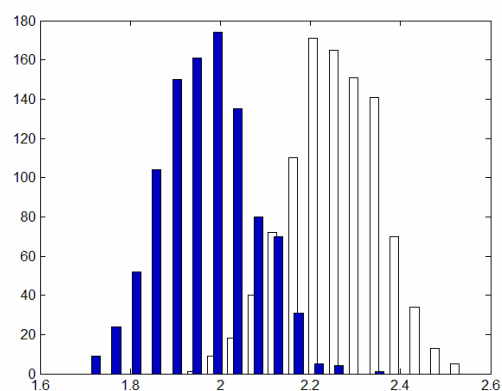


Рисунок 4.3 - Эксперимент 4,
3-е уравнение

ЛИТЕРАТУРА

1. Сильвестров А. Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А. Н. Сильвестров, П. И. Чинаев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 199 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя : пер. с англ. / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.
3. Söderström T. Perspectives on errors-in-variables estimation for dynamic systems / T. Söderström, U. Soverini, K. Mahata // Signal Processing. – 2002. – **82**, No. 8. – P. 1139–1154.
4. Kukush A. Consistency of the structured total least squares estimator in a multivariate errors-in-variables model / A. Kukush, I. Markovsky, S. Van Huffel // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2005. – **133**. – P. 315–358.
5. Markovsky I. Block-Toeplitz/Hankel structured total least squares / I. Markovsky, S. Van Huffel, R. Pintelon // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2005. – **26**, No. 4. – P. 123–147.
6. Söderström T. Errors-in-variables methods in system identification / T. Söderström // Automatica. – 2007. – **43** (6). – P. 939–958.
7. Сарычев А. П. Идентификация состояний структурно-неопределенных систем / А. П. Сарычев – Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины, Ин-т технической механики, 2008. – 268 с.
8. Сарычев А. П. Идентификация систем стохастических динамических дискретных моделей с детерминированными коэффициентами / А. П. Сарычев // Проблемы управления и информатики. – 2005. – № 5. – С. 39–55.
9. Сарычев А. П. Идентификация параметров систем авторегрессионных уравнений при известных ковариационных матрицах / А. П. Сарычев // Международный научно-технический журнал “Проблемы управления и информатики”. – 2012. – № 3. – С. 14–30.

Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, Л.Г. Татарко

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ
С СУЩЕСТВЕННЫМ РАЗЛИЧИЕМ В ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ
В ПРИСУТСТВИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ
ВЕЩЕСТВ**

Аннотация. На основании анализа экспериментальных данных ряда авторов и существующих методик расчета параметров гидротранспорта предложены новые зависимости для определения гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц в присутствии гидродинамически активных веществ. Предложено разбиение частиц на фракции не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности.

Ключевые слова: гидротранспорт, гидравлический уклон, критическая скорость, различие в плотности, гидравлическая крупность

Существующие методики расчета параметров гидротранспорта неадекватно описывают зависимости критической скорости и гидравлического уклона при наличии в транспортируемом материале частиц крупностью менее 0,15 мм с существенной разницей в плотности. Примерами таких материалов могут служить исходные россыпи Вольногорского горно-металлургического комбината и Иршанского горно-обогатительного комбината, в тонких классах которых вместе с частицами глины и суглинка с относительной плотностью 2,7 содержатся частицы концентратов с относительной плотностью 5,6 [1 – 3]. В результате известны случаи аккумуляции концентрата на дне трубопровода при транспортировании россыпей со скоростью выше рассчитанной критической, что приводит к нарушению стабильности процесса гидротранспортирования и режима работы обогатительного оборудования.

На основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении пульп была установлена

причина несоответствия результатов расчетов по существующим методикам практически получаемым величинам, а также обоснованы пути его устранения [1, 2, 4 – 9]. Большая часть методик расчета параметров гидротранспорта разрабатывалась для однородных по плотности материалов, что обеспечивало адекватность расчетных формул при разбиении транспортируемого материала на классы крупности, каждому из которых соответствует свой тип перемещения частиц напорным потоком. Каждому классу крупности в формулах для расчета критической скорости гидротранспортирования и гидравлического уклона соответствует свое слагаемое, пропорциональное массовой доле этого класса в транспортируемом материале. В случае многокомпонентного материала, содержащего частицы с существенным различием в плотности, адекватность такого подхода нарушается, поскольку частицам большей плотности и частицам меньшей плотности одного класса крупности могут соответствовать различные типы перемещения. Этот эффект особенно сильно проявляется для частиц крупностью менее 0,15 мм, которые полностью увлекаются жидкостью и за счет этого повышают плотность несущей среды.

Известные зависимости [5 – 7, 10] позволяют производить расчет параметров гидротранспорта для полидисперсных материалов одной плотности, которая не превышает 2650 кг/м^3 . А.Е. Смолдыревым [6, 7] также предложена классификация материалов на классы крупности (содержащие частицы тонких, мелких и кусковых фракций), в рамках которой для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей получены соответствующие формулы. Однако существующими методиками расчета параметров гидротранспорта не учитывается использование в технологиях переработки минерального сырья флокулянтов, изменяющих параметры несущей среды и транспортируемого материала, а также труб, изготовленных из полимерных материалов. Применение гидродинамически активных веществ (ГДАВ), которые снижают гидравлическое сопротивление трубопроводов напорным потокам гидросмеси и одновременно могут быть флокулянтами для отдельных частиц, является одним из путей снижения энергоемкости процесса гидротранспортирования. Обобщение известных формул с учетом результатов наших исследований [11 – 15] позволило получить универсальные зависимости параметров гидротранспорта для гидросмесей, образованных из полидисперсных мате-

риалов, в присутствии ГДАВ или при использовании труб, изготовленных из полимерных материалов,

$$i = i_0 + P \left(i_0 R_1 + \wp \frac{0,71}{\sqrt{\lambda}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + \wp R_3 \right), \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}; \quad (1)$$

$$V_{kp} = C \sqrt{gD} \sigma^N (R_3 \wp)^M \left(\frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^E; \quad (2)$$

$$P_j = \frac{(\rho_{sj} - 1)(1 - SR_1)}{(1 + (\rho_{s1} - 1)SR_1)} S; \quad \sigma = \frac{\wp P_2}{\chi - P_1 R_1}; \quad \wp = 1 + \sqrt{\frac{d_{cp}}{d_\Phi}} \frac{R_\Phi}{R_2} (1 + k_\phi \theta),$$

$$w = w_0 (1 - S)^{n_w}; \quad w_0 = (\rho_{s2} - 1) \left(0,68 d_{cp} + \frac{t}{52} - 0,5 \right); \quad n_w = \lg \left(\frac{\nu_0 10^5}{d_{cp} w_0} \right);$$

$$C = \begin{cases} 8,14, & q \leq 1; \\ 8,80, & 1 < q; \end{cases} \quad N = \begin{cases} 0,42, & q \leq 1; \\ 0,45, & 1 < q; \end{cases}$$

$$M = \begin{cases} 0,25, & q \leq 1; \\ 0,36, & 1 < q; \end{cases} \quad E = \begin{cases} 0,17, & q \leq 1; \\ 0,09, & 1 < q; \end{cases}$$

$$\chi = \frac{\varepsilon K}{1 - \varepsilon K}; \quad q = \frac{0,29 \wp^3 f^3 R_3^3}{\sigma Fr_w^2 R_1^2 R_2^2}; \quad K = \varepsilon Fr_w^{0,47} \left(\frac{gD}{0,973} \right)^{0,7}, \quad Fr_w = \frac{w}{\sqrt{2g d_{cp}}}, \quad (3)$$

где V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; c_0 , c_1 – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние на критическую скорость мелких и кусковых фракций; D – диаметр трубопровода, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; w – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с; S – объемная концентрация частиц тонкой фракции, д. ед.; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м; Ar_i – параметр Архимеда для частиц i -й фракции; $\rho_s^{(j)}$ – относительная плотность частиц j -го материала; R_1 – массовая доля в транспортируемом материале тонких фракций ($d < 0,15$ мм); R_2 – массовая доля в транспортируемом материале мелких фракций ($0,15$ мм $< d < 2$ мм); R_3 – массовая доля в транспортируемом материале кусковых фракций ($d > 2$ мм); f – обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о нижнюю стенку трубы [6, 7]; i – гидравлический уклон пульпы, м вод. ст. / м; i_0 – гидравлический уклон воды,

м вод. ст. / м; c – эмпирическая константа, учитывающая влияние на гидравлический уклон мелких фракций; λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; V – средняя расходная скорость гидросмеси, м/с; t – температура пульпы, °С; n_w – показатель степени; V_0 – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м²/с; ϕ – коэффициент, учитывающий снижение трения частиц кусковых фракций о дно трубы в случае применения гидродинамически активных веществ или труб, изготовленных из полимерных материалов; θ – массовая доля гидродинамически активного вещества в гидросмеси; k_ϕ – эмпирический коэффициент; d_ϕ – диаметр флокул; K – константа М.А. Великанова; ε – коэффициент, учитывающий изменение константы М.А. Великанова в случае применения гидродинамически активных веществ или труб, изготовленных из полимерных материалов.

Характер перемещения жидкостью твердых частиц каждого класса крупности учитывается в формуле для расчета гидравлического уклона [4, 6, 7]: пропорциональность квадрату скорости для тонких фракций, обратная пропорциональность средней скорости для мелких частиц и независимость от скорости потока для кусковых частиц. При этом влияние концентрации тонких фракций на плотность транспортируемой жидкости учитывается дополнительным сомножителем. Однако опыт применения формул (1) – (3) выявил ряд погрешностей, которые проявляются тем сильнее, чем больше разнородность материала по плотности и гранулометрическому составу. Эти формулы достаточно хорошо описывают зависимость параметров гидротранспорта в случае однородных по плотности материалов, когда различия между плотностями частиц, образующих тонкие, мелкие и кусковые фракции, незначительны. В случае же разнородных материалов, к которым относятся исходные пески россыпных месторождений, когда плотность ценных компонентов в два или три раза превышает плотность вмещающих пород, адекватность зависимостей (1) – (3) нарушается. В частности, наблюдаются завышенные по сравнению с расчетными потери напора, а также имеет место заиливание нижней стенки трубопровода частицами ценного минерала при течении с расчетными скоростями, сверхкритическими для россыпи. Анализ показал, что одной из основных причин этих погрешностей является жесткое разбиение транспор-

тируемого материала на тонкие, мелкие и кусковые фракции. При сравнении граничных диаметров для частиц этих фракций с диаметрами, приведенными в таблицах для определения гидравлической крупности твердых частиц, предложенных В.Н. Гончаровым [4, 9], нетрудно убедиться, что это разбиение материала соответствует трем различным зависимостям для расчета скорости свободного падения частиц в неподвижной и безграничной жидкости.

Тонкие фракции соответствуют частицам с диаметром меньше 0,15 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Стокса [4, 16, 17]

$$w_0 = \frac{gd^2}{\nu_0} \frac{Ar}{18} (1 + k_\phi \theta). \quad (4)$$

Мелкие фракции соответствуют частицам с диаметром более 0,15 и менее 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле

$$w_0 = Ar_2 \left(0.68d_{cp} + \frac{t}{52} - 0.5 \right) \quad (5)$$

Кусковые фракции соответствуют частицам с диаметром больше 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Реттингера [4, 16, 17]

$$w_0 = 1,634 \sqrt{gdAr}. \quad (6)$$

Эта классификация была введена В.Н. Гончаровым для зерен минералов при падении в неподвижной жидкости, а затем перенесена А.Е. Смолдыревым на транспортирование твердых частиц напорными турбулентными потоками без учета того, что стоксовский режим обтекания частиц, для которого справедлива формула (4), ограничивается условием [4, 16, 17]

$$Re = \frac{w_0 d}{\nu_0} \leq 1. \quad (7)$$

Используя формулы (4) и (7), можно оценить диапазон изменения значений числа Рейнольдса Re для характерных диапазонов изменения диаметра и плотности частиц тонких фракций (рис. 1, 2). Из рис. 1 и 2 видно, что с увеличением плотности частиц тонкой фракции значение критерия Рейнольдса может превысить единицу, и условие полного увлечения частиц твердого жидкостью, при соблюде-

нии которого гидросмесь может рассматриваться как однородная жидкость, будет нарушено.

Определить граничное значение параметра Архимеда, при котором нарушается условие (7), можно, подставив формулу (4) в неравенство (7) и после несложных преобразований получив ограничения на параметр Архимеда частиц тонких фракций, для которых режим обтекания еще будет стоксовским (рис. 3)

$$Ar < Ar'; \quad (8)$$

$$Ar' = \frac{1}{1 + k_\phi \theta} \frac{18\nu_0^2}{gd^3}. \quad (9)$$

Из рис. 3 видно, что обтекание частиц тонких фракций с относительной плотностью более 4 происходит в режиме, который уже не позволяет рассматривать их смесь с водой как однородную жидкость более высокой плотности. Поэтому потери напора, обусловленные наличием таких частиц в жидкости, должны быть пропорциональны не их относительной плотности и квадрату скорости, а соотношению их гидравлической крупности и средней скорости гидросмеси, как это имеет место для частиц мелких фракций. Таким образом, частицы крупностью менее 0,15 мм, для которых выполняется условие (8), необходимо относить к тонким фракциям, а частицы, для которых это условие не выполняется, относить к гидравлически мелким фракциям. За счет этого корректируются массовые доли тонких и мелких фракций в транспортируемом материале, пересчитывается относительная плотность несущей жидкости, а также частиц тонкой и мелкой фракций, уточняется гидравлическая крупность частиц мелких фракций, что в итоге способствует повышению точности расчетов параметров гидротранспорта многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц.

Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами других авторов [6 – 9, 18], исследовавших процессы гидротранспортирования концентратов железных и медных руд. Для этих материалов потери напора состоят из потерь напора на перемещение несущей жидкости, которые определяются так же, как при течении чистой воды, и дополнительных потерь напора, которые вычисляются по формулам, аналогичным формулам для частиц мелких фракций.

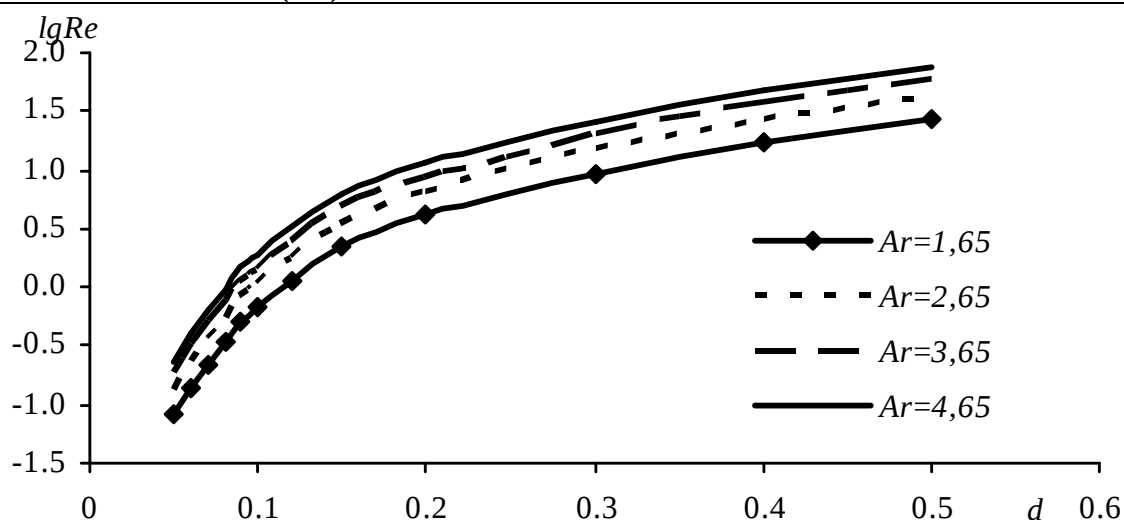


Рисунок 1 – Зависимость логарифма критерия Рейнольдса от диаметра частиц при различных значениях параметра Архимеда

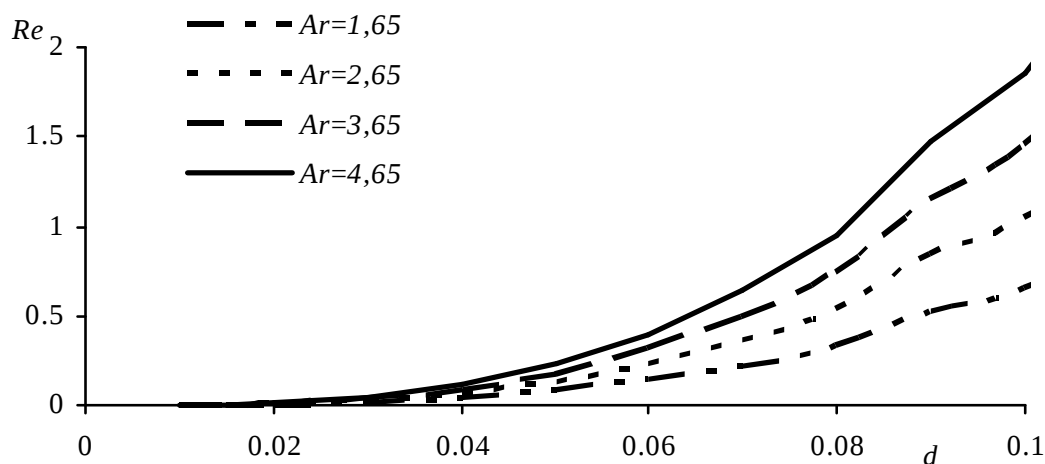


Рисунок 2 – Зависимость значения критерия Рейнольдса от диаметра частиц тонкой фракции при различных значениях параметра Архимеда

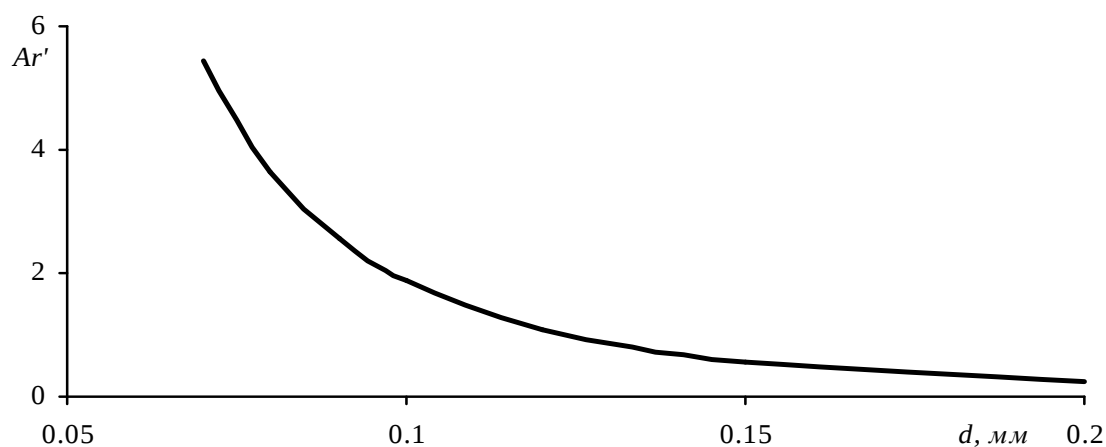


Рисунок 3 – Зависимость граничного значения параметра Архимеда от диаметра частиц тонкой фракции при $\theta=0$

В присутствии гидродинамически активного вещества кривые будут располагаться в области ниже кривой, приведенной на рис. 3, однако в результате процесса флокуляции часть тонких фракций переходит в мелкие не по причине иного режима обтекания их жидкостью, а из-за образования флокул.

Сопоставление расчетных значений критической скорости и гидравлического уклона по предлагаемой методике с экспериментальными данными [1, 3, 19 – 21] показывает, что среднее относительное отклонение расчетных значений от опытных для гидравлического уклона составляет 8,3, а для критической скорости – 3,9 %.

Выводы

1. На основе анализа экспериментальных данных ряда авторов и соответствующих методик расчета предлагается при определении параметров гидротранспорта многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц производить разбиение частиц материала на тонкие и мелкие фракции не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности.

2. Получено ограничение на параметр Архимеда частиц тонких фракций, позволяющее разделить геометрически тонкие фракции на тонкие и гидравлически мелкие.

3. Предложены зависимости для расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования многокомпонентных полидисперсных материалов с существенным различием в плотности частиц в присутствии гидродинамически активных веществ, обеспечивающие повышение точности расчетов параметров гидротранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семененко Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
2. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
3. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам. – К.: Наукова думка, 1964. – 88 с.
4. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
5. Нурок Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 583 с.

6. Смолдырев А.Е. Расчет рудничного трубопроводного транспорта. – М.: Изд. литературы по горному делу, 1961.
7. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
8. Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
9. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.:Наук.думка,1990.–160 с.
- 10.Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
- 11.В. Blyuss, Eu. Semenenko, N. Nykyforova. The calculation procedure of hydrotransport parameters of bulk solids using hydrodynamically active additives solutions // Papers presented at the 14th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, June 23 – 27, 2008, Saint Petersburg, Russia. – Pp. 41 – 48.
- 12.Семененко Е.В., Никифорова Н.А. Расчет параметров взвесенесущих потоков в присутствии гидродинамически активных добавок // Вісник Дніпропетровського університету: Науковий журнал – Дніпропетровськ, 2008. – Т. 16, № 5. – Серія Механіка. – Вип. 11, т. 1. – С. 83 – 91.
- 13.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Семененко Е.В. Усовершенствование методики расчета гидравлического уклона пульпы при гидротранспорте отходов обогащения // Горное оборудование и электромеханика: Научно-аналитический и производственный журнал. – Москва: "Новые технологии", 2009. – № 10. – С. 41 – 44.
- 14.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Семененко Е.В. Усовершенствование методики расчета критической скорости при гидротранспорте отходов обогащения // Горное оборудование и электромеханика: Научно-аналитический и производственный журнал, 2009. – № 11. – Москва: "Новые технологии". – С. 46 – 51.
- 15.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Шмелев Н.А. Метод расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов при использовании гидродинамически активных веществ // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наукових праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 85. – С. 186 – 191.
- 16.Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения /. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
- 17.Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980. – 400 с.
- 18.Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
- 19.Buckingham A.C. Siekhaus W.J. Interactions in multidimensional two fluid computations in turbulent flow // AIAA Pap. – 1981. – № 346. – P. 15.
- 20.Кривенко Ю.Н. Исследование высококонцентрированных потоков, содержащих крупнозернистый материал: дисс. ... канд. техн. наук: 278. – К.: 1968. – 107 с.
- 21.Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.

Л.Д. Чумаков, А.А. Черная

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРИ
НЕПРЕРЫВНОМ КОНТРОЛЕ ЕЕ ИСПРАВНОСТИ
С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Аннотация. Обсуждаются вопросы оценки величины эффективности эксплуатации технической системы на этапе ее разработки при наличии иерархической системы управления запасами.

Введение

Большинство сложных технических систем (ТС) не обеспечивают высокого уровня эффективности при их использовании без принятия специальных мер.

Таковыми мерами могут быть контроль технического состояния систем в процессе их эксплуатации, построение и эксплуатация систем управления запасами (СУЗ), выбор оптимальных стратегий эксплуатации ТС и др.

Выбор на этапе проектирования оптимальных структуры СУЗ и количества запасных ТС на каждом уровне СУЗ чрезвычайно важен. Недостаток запасных ТС снижает уровень эффективности ТС, а избыток может существенно увеличить стоимость их эксплуатации.

Анализ публикаций по теме исследования

В работе [1] рассмотрена задача оценки эффективности группы ТС, функционирующих совместно с двухуровневой СУЗ. Считалось, что ТС могут отказывать как при их непосредственном использовании, так и при хранении на складе 1-го уровня. При эксплуатации периодически проверялось техническое состояние ТС.

Приведены формулы для оценки эффективности группы ТС (коэффициента готовности), а также стоимости эксплуатации. Показаны их зависимости от характеристик ТС и СУЗ.

Вместе с тем, при эксплуатации техническое состояние ТС может проверяться не только периодически, но и непрерывно.

В этом случае оценка эффективности технической системы при ее эксплуатации с учетом особенностей СУЗ может вызывать определенные трудности.

Цель статьи

Цель статьи – показать возможности оценки эффективности эксплуатации группы ТС в составе СУЗ при непрерывном контроле их исправности с помощью математической модели для периодического контроля.

Основная часть

Будем рассматривать структуру СУЗ, приведенную на рис. 1.

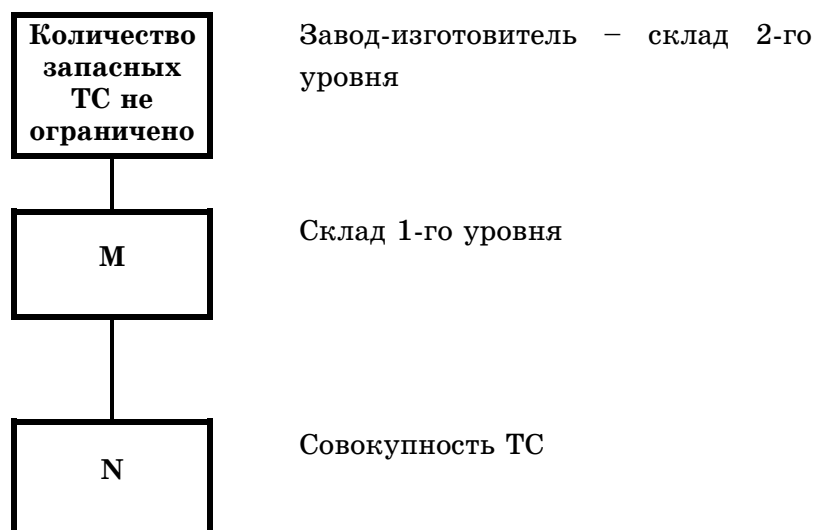


Рисунок 1 - Структура системы управления запасами

Рассматривается процесс эксплуатации множества N однотипных ТС, которые должны выполнить задачу при поступлении команды в случайный момент времени, равномерно распределенный на интервале $(0, T)$. Исправность всех ТС проверяется одновременно с периодичностью θ . При этом число выявленных неисправных ТС при проверке является случайной величиной.

Замена неисправных ТС исправными осуществляется системой обслуживания, в которую входит СУЗ. СУЗ состоит из складов двух уровней. Склад 2-го уровня является заводом-изготовителем.

В складе 1-го уровня содержится M запасных ТС.

Запасные ТС на складе 1-го уровня отказывать в процессе хранения не могут.

В складе 2-го уровня есть неограниченное количество исправных запасных ТС.

При обнаружении отказа неисправная ТС заменяется исправной из склада 1-го уровня. Для этого подается заявка на склад 1-го уровня, где выбирается запасная ТС. Склад 1-го уровня пополняется исправными ТС с завода-изготовителя.

Время наступления отказов основных ТС описывается экспоненциальным распределением, $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$, для которого параметр $\lambda = \text{const}$.

На проверки исправности ТС тратится время t_z .

Замена одной неисправной ТС продолжается z единиц времени.

Период между проверками исправности всех устройств находится по формуле:

$$\theta = T / (n + 1), \quad (1)$$

где T – момент окончания эксплуатации ТС, n – число проверок в течение срока эксплуатации.

Эффективность ТС оценивается величиной коэффициента готовности за весь срок эксплуатации, которая определяется по формуле:

$$k_r = [\int_D k_r(t) dt] / T, \quad (2)$$

где $k_r(t)$ – текущий коэффициент готовности;

D – совокупность межпроверочных интервалов.

$$k_r(t) = \begin{cases} k_r^*(t) & \text{при } t_i'' \leq t \leq t_{i+1}'; \\ 0 & \text{при } t_i' \leq t \leq t_i''. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь t_i' – момент начала i -й периодической проверки ТС; t_i'' – момент окончания обслуживания ТС после i -й проверки; $t_{i+1}' - t_i' = \theta$.

Нижней оценкой для коэффициента готовности является величина

$$k_r = \{1 - \exp(-\lambda \theta) + n[\exp(-\lambda Z) - \exp(-\lambda \theta)]\} / (\lambda T) \quad (4)$$

Здесь Z – длительность устранения неисправности основной ТС.

В результате проведения u -й проверки на склад 1 с вероятностью P_x поступает x заявок:

$$P_x = C_N^x \exp(-\lambda(\theta + \tau_s)(N - x)) [1 - \exp(-\lambda(\theta + \tau_s))]^x \quad (5)$$

где C_N^x – число сочетаний из N по x .

Продолжительность технического обслуживания одной ТС определяется как средняя величина:

$$Z = (\Sigma x=1MZ1Px + \Sigma x=M+1NZ2Px) / N, \quad (6)$$

где Z1 – продолжительность технического обслуживания с заменой неисправной ТС из склада 1, а Z2 – продолжительность технического обслуживания с заменой неисправной ТС из склада 2.

Стоимость эксплуатации определяется по формуле:

$$C = c_I + (c_n + c_M + c_{z1} + c_{z2} + c_{II}(1 - k_r)) / N. \quad (7)$$

где c_I – стоимость одной ТС;

c_n – стоимость контроля исправности N ТС;

c_M – стоимость содержания СУЗ;

c_{z1} – стоимость замен из склада 1;

c_{z2} – стоимость замен из склада 2;

c_{II} – стоимость потерь из-за невозможности выполнить поставленную ТС задачу.

Пример. В эксплуатации находится 10 бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ). В состав одной БЦВМ входит: 17 БИС с интенсивностью отказов $9E-07$ 1/час., 72 БИС с интенсивностью отказов $1E-08$ 1/час., 905 СИС с интенсивностью отказов $2,5E-09$ 1/час., 84 ИМС с интенсивностью отказов $9E-09$ 1/час., 1106 трансформаторов с интенсивностью отказов $3E-09$ 1/час., 606 диодов с интенсивностью отказов $2E-09$ 1/час. Интенсивность отказов БЦВМ составляет $2,36E-05$ 1/час. Предполагается эксплуатировать БЦВМ в течение 87600 час. Примем следующие значения характеристик технического обслуживания: $t_z = 20$ час., $Z1 = 5$ час., $Z2 = 20$ час.

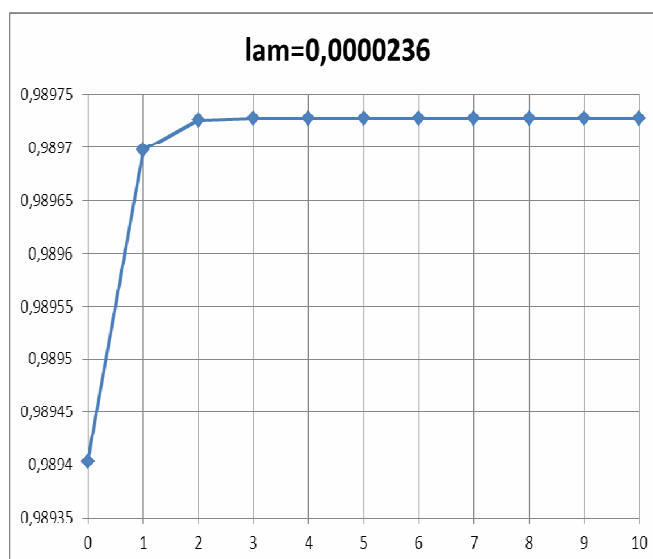


Рисунок 2 - Зависимость $k_r = f(M)$

Для имитации непрерывного контроля исправности ТС в модели периодического контроля значительно увеличивалось число проверок, так что величина межпроверочного интервала существенно уменьшалась.

Из рис. 2 следует, что в зависимости от требований к величине коэффициента готовности, можно изменять структуру СУЗ. Так, если $k_r \leq 0,989$, то можно не использовать специальную СУЗ, а замены осуществлять из завода-изготовителя.

Если же k_r должен быть не менее $0,99$, то необходим склад 1-го уровня с числом запасных ТС $M = 1$.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Таким образом, показана возможность использовать математические модели эксплуатации систем с периодическим контролем технического состояния для оценки эффективности систем с непрерывным контролем их технического состояния. Этот подход позволяет анализировать функционирование иерархических систем управления запасами и находить оптимальные значения их характеристик при проектировании.

В перспективе предполагается проводить работу по дальнейшему исследованию иерархических систем управления запасами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаков Л.Д. Определение коэффициента готовности и стоимости периодического обслуживания технического устройства при наличии двухуровневой системы снабжения и ограниченном числе ремонтников [Текст] / Л.Д Чумаков. Вероятностно-статистические методы исследования сложных систем, Наук. Думка, К. : 1977, с. 95-100.

Т.А. Шарабура

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ И СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЦИКЛОННОМ ПРЕДТОПКЕ

Аннотация. Приведена методика математического моделирования при использовании программного пакета "SigmaFlow", который позволяет описывать процессы аэродинамики и теплообмена при термической переработке топлив. При моделировании учтены особенности горения и газификации водоугольного топлива и использовались кинетические константы и значения энергий активации, наиболее полно описывающие реальный процесс переработки топлива. В результате моделирования процессов газификации и сжигания водоугольного топлива в циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер получены температурные поля и поля концентраций угольных частиц по сечению предтопка, а также составы продуктов термической переработки.

Ключевые слова: водоугольное топливо, программный пакет "SigmaFlow", термическая переработка, циклонный предтопок, температурное поле, концентрация веществ.

Введение

Украина располагает значительными запасами низкокалорийных углей, широкое и эффективное применение которых позволит значительно расширить энергетическую базу страны. Перспективным направлением применения низкокалорийных энергоносителей как топлива является получение на их основе водоугольного топлива, которое может быть использовано в различных энергетических агрегатах [1]. Поскольку водоугольное топливо является относительно новым видом топлива, а механизм его термической переработки отличается от переработки угля, то для эффективного использования водоугольного топлива в энергетике необходимо исследовать режимные параметры и основные закономерности процессов термической переработки с разработкой новых конструкций топочных агрегатов.

Современные топочные агрегаты отличаются большим разнообразием аэродинамических схем, а аэродинамика является одним из факторов, определяющих процессы горения и теплообмена в топочных устройствах. При проектировании и создании топочных устройств широко применяется математическое моделирование, основанное на физических законах, описывающих процессы аэродинамики и теплообмена.

Одним из программных пакетов, который эффективно описывает процессы аэродинамики и теплообмена в топочных устройствах, является пакет для численного моделирования “SigmaFlow” (Красноярский филиал института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия), который показал высокую точность при исследовании широкого класса гидродинамических и теплофизических процессов и оптимизации технологического оборудования объектов теплоэнергетики, гидроэнергетики и атомной энергетики [2-4].

Постановка задачи и цели исследования

Термическую переработку водоугольного топлива предлагается осуществлять в циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер. Циклонный предтопок состоит из камеры предварительной переработки, в которой происходит выход и горение летучих водоугольного топлива, и непосредственно камеры для сжигания или газификации. Данный предтопок имеет тангенциальную аэродинамическую схему движения теплоносителей. В предтопке предполагается использование поточной автотермической технологии в закрученном потоке, что обеспечивает высокую интенсивность процесса и высокую степень конверсии углерода [5].

Задачей данной работы является проведение исследований топочных процессов газификации и сжигания водоугольного топлива в циклонном предтопке при помощи математического моделирования в программном пакете “SigmaFlow” с учетом отличительных особенностей термической переработки водоугольного топлива.

Методика исследований и анализ полученных данных

При моделировании в программном пакете “SigmaFlow” предполагается, что течение газов является пространственным и турбулентным. Считается, что турбулентное течение, так же как и ламинарное, можно описать при помощи уравнения Навье-Стокса. В программе “SigmaFlow” в качестве модели турбулентности используется

стандартная k-ε модель, которая позволяет описывать достаточно широкий класс турбулентных течений, включающих как сдвиговую, так и гравитационную турбулентность и является моделью турбулентности первого уровня замыкания. Уравнения, описывающие данную модель, выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right) + P - \rho \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2)$$

где k - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, ε - скорость диссипации турбулентности, $\mathbf{v}$ - усредненное по времени поле скоростей, μ_t - турбулентная вязкость, μ - динамическая (молекулярная) вязкость, P - скорость генерации турбулентности, ∇k , $\nabla \varepsilon$, C_1 , C_2 – константы стандартной модели, которые согласно [6] составляют: $\nabla k=1,0$, $\nabla \varepsilon=1,3$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$.

Уравнение сохранения энергии рассматривается в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} h) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

где h - энтальпия многокомпонентной среды, λ - коэффициент теплопроводности, S_h – источниковый член, отвечающий за приток (отток) энергии в процессе химического реагирования, излучения, или каких-либо других процессах.

Свойства водоугольного топлива, такие как теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость, энтальпия, динамическая вязкость молярная масса определяются через массовые доли его компонентов.

Уравнение переноса концентрации компонентов:

$$\frac{\partial \rho Y_m}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} Y_m) = \nabla(\rho D_m \nabla Y_m) + S_{Y_m} \quad (4)$$

$$m = 1 \dots N,$$

где Y_m - массовая доля m-той компоненты, D_m - коэффициент диффузии компонента m, S_{Y_m} – источниковый член, отвечающий за изменение компоненты в процессах химического реагирования или в каких-либо других процессах.

Вблизи стенок турбулентный поток имеет сложную структуру со значительными градиентами. Во внутренней области, занимающей

порядка 20% толщины пограничного слоя, генерируется около 80% всей энергии турбулентности. Для моделирования пристеночных течений применяется метод пристеночных функций, связывающий параметры течения с расстоянием до стенки, который представляет собой аналитическое решение упрощенных решений турбулентного течения. В основе упрощения лежат следующие предположения: локальное равновесие энергии турбулентных пульсаций (локальная скорость производства турбулентности уравнивается скоростью вязкой диссипации), постоянство касательного напряжения вдоль слоя, пренебрежимо малый градиент давления вдоль потока, локальная изотропность диссипирующих вихрей, универсальность профиля скорости (слабая зависимость от числа Рейнольдса).

Для решения уравнения переноса энергии используется широко известный метод контрольного объема, суть которого заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы (рис. 1) и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно разностных соотношений. Свойства метода достаточно подробно описаны в литературе [7,8]. В данном пакете используются многоблочные структурированные криволинейные сетки с исключаемыми областями.

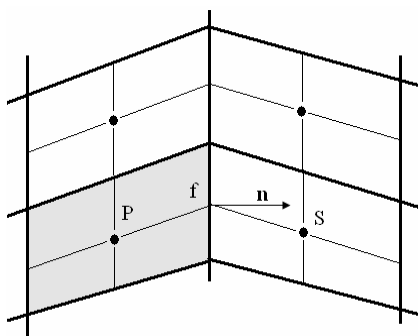


Рисунок 1 - К вычислению потоков через грань контрольного объема

Процесс теплообмена представляет собой сложное радиационно-конвективное взаимодействие между топочной средой и ограничивающими поверхностями в условиях значительной неизотермичности, сложной аэродинамики и горения топлива, многократного отражения и рассеяния селективного излучения. Высокий температурный уровень среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. В связи с этим при проведении теплового расчета

предъявляются повышенные требования к учету радиационной составляющей в суммарном теплообмене.

В данной работе для описания процессов движения топливных частиц используется метод Лагранжа. При моделировании движения частиц основными силами, воздействующими на частицу, являются сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического сопротивления) и сила тяжести.

Уравнение движения частицы записывается как:

$$\frac{dU_{ip}}{dt} = C_w A_p \frac{\rho}{2} U_r (U_i - U_{ip}) - \rho g_i, \quad (5)$$

где $C_w = \frac{24}{Re_p} f_k$, $Re_p = \frac{U_r d_p \rho}{\mu_{mol}}$, $U_r = \left(\sum_{i=1}^3 (U_i - U_{ip})^2 \right)^{1/2}$, d_p – диаметр частицы, U_i – i-ая компонента скорости газа, $U_i = \bar{U}_i - U_i'$, $\bar{U}_i$ – средняя i-ая компонента скорости газа, U_i' – пульсационная составляющая скорости газа, U_{ip} – i-ая компонента скорости частицы, C_w – коэффициент сопротивления.

Коэффициент f_k для различных Re_p , можно записать следующим образом:

$$f_k = \begin{cases} 1, Re_p \ll 1 \\ 1 + 0,15 Re_p^{0,687}, Re_p \leq 1000 \\ 0,44 \left(\frac{Re_p}{24} \right), Re_p > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

Учет турбулентности потока на движение частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц.

Предполагается, что водоугольное топливо представляется дискретным набором частиц, которые подаются через форсунки в топочную камеру. Для моделирования процессов горения и газификации водоугольного топлива в программе “SigmaFlow” используется модифицированная диффузионно – кинетическая модель, которая представляется в виде последовательных этапов.

Первый этап заключается в прогреве и испарении влаги из топлива. При испарении влаги используется модель испарения отдельной капли, которая рассчитывается на основе значения количества водяного пара на поверхности частицы и в объеме:

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}), \quad (7)$$

где N_i – молярный поток пара, k_c – коэффициент массопереноса, $C_{i,s}$ – концентрация пара на поверхности частицы, $C_{i,\infty}$ – концентрация пара в объеме.

После испарения влаги происходит распад частицы. Образовавшиеся после распада частицы выгорают по модели воспламенения и горения частицы угля [9,10]. А для описания процессов газификации водоугольного топлива в математической модели были реализованы реакции паровоздушной конверсии угля. Но при этом необходимо учитывать, что процесс горения водоугольного топлива отличается от горения угля [11,12] и, соответственно, отличаются значения кинетических констант и энергий активации. При исследовании процессов сжигания и газификации водоугольного топлива в предложенный программный пакет заложены дополнительные реакции и уточненные значения констант равновесия и энергий активации применительно к данному топливу [13-15]. Это позволило наиболее полно и приближенно к реальным условиям описать процессы горения и газификации водоугольного топлива.

В процессе выгорания частицы угля происходит уменьшение ее массы и диаметра, плотность частицы остается постоянной.

Изменение диаметра частицы за счет горения описывается уравнением

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{2}{\rho_k} K_s^c, \quad (8)$$

где ρ_k – плотность коксового остатка, K_s^c – скорость горения углерода.

Температура частицы определяется уравнением сохранения энергии

$$\frac{m_{\text{ч}} C_{\text{ч}} dT}{4\pi r_{\text{ч}}^2 dt} = \varepsilon \sigma (T_{\text{рад}}^4 - T_{\text{ч}}^4) + \alpha_{\text{конв}} (T_{\text{г}} - T_{\text{ч}}) + \frac{QH}{4\pi r_{\text{ч}}^2}, \quad (9)$$

где $C_{\text{ч}}$ – теплоемкость материала частицы, ε – степень черноты материала частицы, σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $T_{\text{рад}}$ – температура излучающего объема, $T_{\text{ч}}$ – температура частицы, $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Q – удельный тепловой эффект реакции.

Ослабление конвективного теплообмена, которое объясняется выходом паро- и газообразных веществ с поверхности угольных частиц водоугольного топлива при их разогреве, можно учитывать веде-

нием числа Нуссельта в зависимости от критерия Пекле внешнего омывания (Pe) и критерия Пекле газовыделения ($\overline{Pe}$)

$$Nu = 2 + \frac{Pe}{2} - \frac{37}{960} Pe^2 - \frac{Pe\overline{Pe}}{4} - \frac{\overline{Pe}}{2}, \quad (10)$$

$$\overline{Pe} = \frac{w\delta}{a}, \quad (11)$$

где w - скорость выхода продуктов реакции и летучих.

Так как при горении углеродных частиц теплообмен с газовой средой протекает более интенсивно [16], то в математическую модель вводится коэффициент, учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен.

$$\alpha_{\text{конв}}^{\text{гор}} = \alpha_{\text{конв}} K_{\text{гор}}, \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{конв}}^{\text{гор}}$ - эффективный коэффициент конвективного теплообмена между горящими угольными частицами и газом, $\alpha_{\text{конв}}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности частицы при отсутствии горения.

Известно [17], что коэффициент $K_{\text{гор}}$, учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен между частицами угольной пыли и газовой средой, в определенном интервале, мало зависят от размеров частицы и концентрации кислорода в газовой среде, и в интервале температур 1200-1600 К коэффициент $K_{\text{гор}}$ может быть записан в следующем виде:

$$K^{\text{гор}} = 145 e^{-\frac{5000}{T_{\text{г}}}}. \quad (13)$$

Программный пакет “SigmaFlow” позволяет получить температуры и концентрации газообразных компонентов и угольных частиц в центральном сечении и по длине каждой камеры, а также векторное поле скоростей для каждой камеры топочного устройства.

При моделировании процессов термической переработки водоугольного топлива предполагалось, что температура воздуха на входе в каждую камеру предтопка составляет 400°C, а температура топлива при подаче составляет 150°C. Подогрев энергоносителей на входе в предтопок осуществляется для достижения требуемого температурного уровня процессов термической переработки [18]. Расчеты производились применительно к водоугольному топливу из газового угля украинского месторождения с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{p}}=15,1$ МДж/кг и содержанием твердой фазы 61,5%.

В результате вычислений на исследуемый объект (циклонный предтопок) накладывается расчетная сетка. Сеточная модель циклонного предтопка представлена на рис. 2.

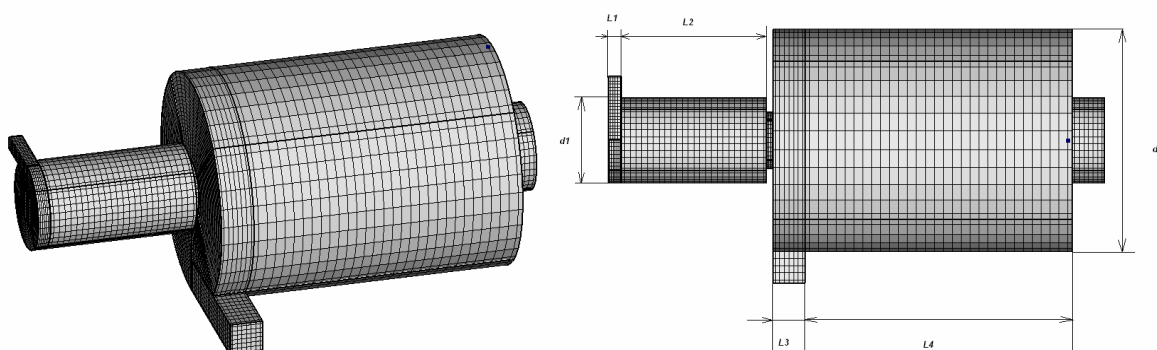


Рисунок 2 - Сеточная модель циклонного предтопка

При моделировании предполагается, что в качестве основных управляющих параметров для достижения требуемого состава продуктов термической переработки топлива принимается коэффициент расхода окислителя и температура процесса. Характеристики температурных полей по сечению циклонного предтопка представлены на рисунке 3.

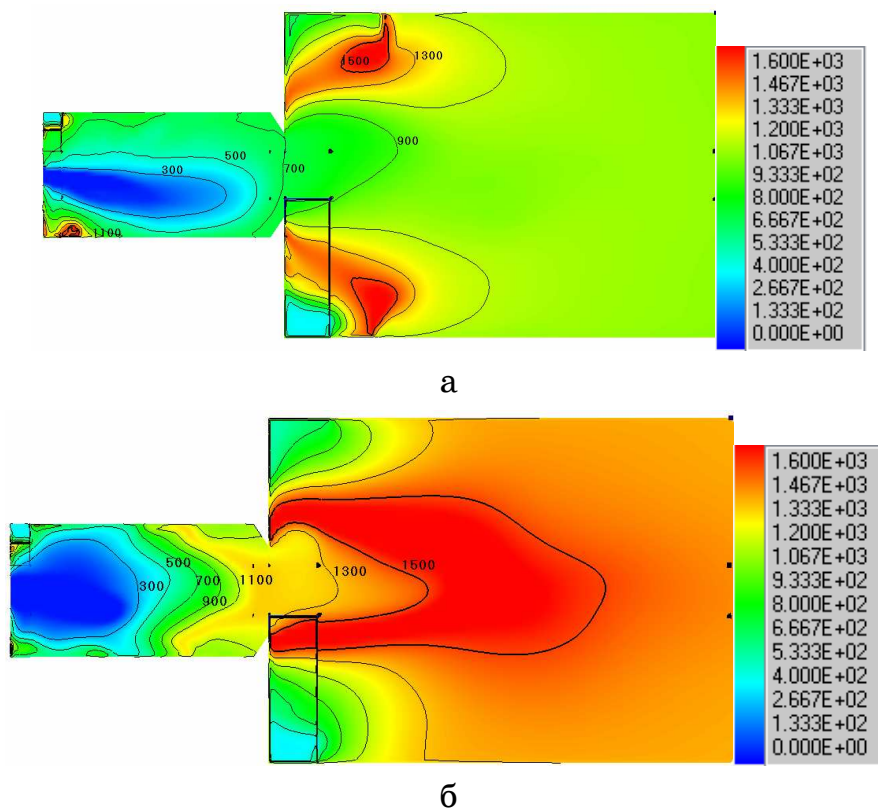


Рисунок 3 - Поле температур в центральном сечении при газификации (а) и горении (б) водоугольного топлива, °С

Как видно из полученных данных, при газификации водоугольного топлива температура в первой камере предтопка составляет 300-500 °С, что является достаточным условием для выхода и частичного горения летучих топлива. Во второй камере предтопка, где происходит догорание летучих и газификация топлива, уровень температур составляет порядка 900 °С.

При сжигании водоугольного топлива в первой камере предтопка происходит выход и горение летучих веществ и температура при этом составляет 900-1100 °С. Во второй камере наблюдается активное горение коксового остатка топлива, а температура достигает 1300-1500 °С. При этом важно, что поток продуктов горения водоугольного топлива по сечению циклонного предтопка на выходе имеет равномерную температуру.

Концентрация угольных частиц в по сечению циклонного предтопка при газификации и сжигании водоугольного топлива представлена на рис. 4

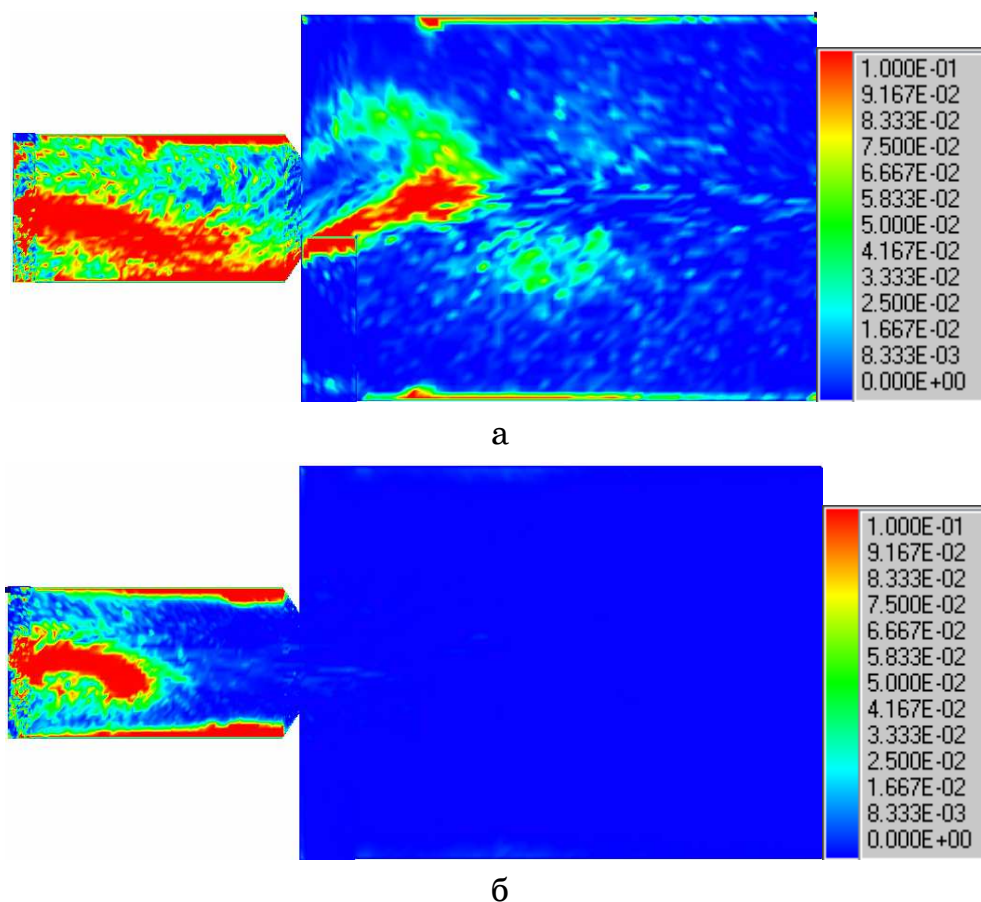


Рисунок 4 – Концентрация угольных частиц в центральном сечении предтопка при газификации (а) и горении (б) водоугольного топлива, кг/м³

Представленные результаты показывают, что при термической переработке водоугольного топлива в циклонном предтопке присутствует незначительный механический недожог топлива. При этом степень конверсии углерода при газификации водоугольного топлива составляет 90,8 %, а при сжигании она достигает 93,3 %. Эти показатели являются значительно выше, чем при термической переработке угольной пыли (83-87%).

Полученные при моделировании составы продуктов термической переработки на выходе из циклонного предтопка представлены в таблице 1.

Таблица 1

Состав продуктов термической переработки водоугольного топлива

Состав продуктов переработки, % об.	Воздушная газификация	Сжигание
CO	14,1	~ 0
H ₂	5,9	~ 0
CO ₂	8,5	11,8
H ₂ O	16	16,5
CH ₄	6,8	~ 0
N ₂	48,7	66,2
O ₂	~ 0	5,5

При газификации водоугольного топлива в циклонном предтопке образуется газ с содержанием 26,8% горючих компонентов, при этом теплота сгорания газа составляет 4,9 МДж/м³. При газификации топлива можно поддерживать такой расхода окислителя, который устанавливает необходимое соотношение восстановительных и окислительных компонентов в газе, определяемое технологией его использования.

При сжигании водоугольного топлива в циклонном предтопке состав продуктов горения свидетельствует о протекании реакций полного горения с образованием конечных продуктов CO₂ и H₂O.

Полученные результаты математического моделирования термической переработки водоугольного топлива в двухкамерном циклонном предтопке описывают процессы, происходящие в топочных устройствах такого типа, и могут быть использованы при создании предтопков для переработки водоугольного топлива.

Выводы

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что использование программного пакета “SigmaFlow” с учетом особенностей горения водоугольного топлива позволяет исследовать процессы

термической переработки водоугольного топлива в достаточно широком диапазоне.

Термическую переработку водоугольного топлива предлагается осуществлять в двухкамерном циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер с использованием поточной автотермической технологии в закрученном потоке.

Установлено, что процесс термической переработки водоугольного топлива в циклонном предтопке целесообразно проводить при подогреве воздуха до 400 °С и подогреве топлива до 150 °С, что обеспечивает необходимый температурный уровень процессов газификации (900-1000 °С) и горения (1300-1500 °С). При этом степень конверсии углерода при газификации водоугольного топлива составляет 90,8 %, а при сжигании она достигает 93,3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.С., Егурнов А.И., Борук С.Д. и др. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность // *Хімічна промисловість України*. - 2007. - №2 (79). - С. 56-60.
2. Чернецкий М.Ю., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Суржикова Н.С. Модифицированная математическая модель для расчета факельного сжигания углей микропомола // *Материалы региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий»*, 25-27 июня 2009г. – Томск. - С. 159-165.
3. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // *Физика горения и взрыва*. – 2011. - № 3. - С. 37-46.
4. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Чернецкий М.Ю., Суржикова Н.С. Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах // *Тепловые процессы в технике*. – 2011. – Т.3. - №3. - С.140-144.
5. Пинчук В.А., Губинский М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии // *Металургійна техніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України*. - Дніпропетровськ: «Нова ідеологія». - 2008. - С. 221-227.

6. Launder B. E. and Spalding D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flow // Comp. Methods Appl. Mech. Eng. - 1974. - Vol. 3. - P. 269–289.
7. Андерсон, Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - М.: Мир, 1990..– 726 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
9. Виленский Т.В., Хзмаян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.
10. Волков Э.П., Горячев В.Д., Гусев И.Н., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Математическое моделирование топочных процессов в камерных топках при сжигании пылеугольного топлива // Сибирский физико-технический журнал. - 1991.– № 5. - С. 122–125.
11. Делягин Г.Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии / Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: Наука, 1967.- С. 55-67.
12. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: Наука, 1967. - С. 45-55.
13. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива – М., 1958. – 598 с.
14. Померанцев Б.В, Арефьев К.И, Ахмедов Д.В. Основы практической теории горения – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
15. Палеев И.И., Юдин В.Ф. Взаимодействие водяного пара с углеродом топлива // Газовая промышленность. -1957. - № 5.
16. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва - М., 1957. – 442 с.
17. Бабий В.И. Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 209 с.
18. Шарабура Т.А, Пинчук В.А., Шевченко Г.Л.. Влияние температуры подогрева водоугольного топлива на его свойства и состав // Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Выпуск 2(17). – Днепропетровск: Новая идеология, 2010. – С. 205-211.

В.И. Кузнецов, Г.Л. Евтушенко, И.В. Гайдуков,
С.А. Гаращенко, Д.А. Левченко, А.Д. Светличный
**СИСТЕМА РАНЖИРОВАНИЯ
ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВУЗА NOOSCORE**

Аннотация. Рассматривается разработка требований к системе расчета рейтинга подразделений вуза на основе метода взвешенных сумм. Разрабатываемое веб-приложение «Система ранжирования подразделений вуза NooScore» позволит не только, уменьшить трудоёмкость скоринга, но и сделать процесс составления рейтинга прозрачнее.

Ключевые слова: рейтинг, скоринг, МКА, МВС.

Введение

Составление рейтингов признаётся важным инструментом для управления качеством в различных сферах деятельности.

Существуют два основных подхода к составлению рейтингов:

- 1) на основе опроса экспертов (иногда – и на основе социологических опросов);
- 2) на основе многокритериального анализа с использованием специальных методик.

Оба подхода имеют много вариантов, свои достоинства и недостатки. Многокритериальный подход позволяет интегрировать в общей оценке, как количественные результаты, так и экспертные оценки. При этом, оценки сводятся к возможно более простым и локализируются в общей схеме рейтинга. Многокритериальный подход является более универсальным и объективным, нежели экспертный («социологический»), где велика роль субъективизма: недостаточной квалификации, личных пристрастий, скрытых целей, влияний одних респондентов на других. Социологический подход вместе с тем представляется (не всегда обоснованно) более демократичным, поскольку каждый респондент влияет на результат.

Рейтинги, как правило, характеризуются большим количеством разнородных критериев оценки – факторов, влияющих на общую

оценку. Эти критерии имеют сложную иерархическую структуру. Количество объектов в рейтинге может быть большим. Процедура расчета называется скорингом, от англ. “to score” – оценивать, подсчитывать очки, баллы. Скоринг представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Основной проблемой в рейтингах на основе многокритериального анализа является обоснованное определение весов критериев. Вес критерия показывает его относительную важность на своём уровне иерархии.

На кафедре «Информационные технологии и системы» НМетАУ разрабатывается система расчёта рейтинга подразделений вуза NooScore. Она реализуется в виде веб-приложения с различными уровнями доступа. Эта система, по нашему мнению, позволит решить обе проблемы. Во-первых, резко уменьшается трудоёмкость скоринга, что позволяет проводить компьютерные эксперименты и улучшать модель. Во-вторых, процесс составления рейтинга становится прозрачнее: пользователи смогут участвовать в процессе формирования весов критериев и вырабатывать мероприятия по повышению своего места в будущем рейтинге.

Основная часть

Составление рейтинга подразделений вуза проводится с целью активизировать работу преподавателей, аспирантов (докторантов), сотрудников, кафедр, факультетов с целью анализа показателей деятельности для повышения качества образования, имиджа вуза, его места в общем рейтинге.

Таким образом, необходимо не только рассчитать рейтинг подразделений и сформировать отчеты, но и предоставить подразделениям инструмент для анализа оценки их деятельности, который позволит выявлять их сильные и слабые стороны, на основе анализа рейтинга разрабатывать стратегию работы на следующий год.

В качестве такого инструмента предлагается разрабатываемое авторами веб-приложение «Система расчёта рейтинга подразделений вуза NooScore». Концепция данного приложения предусматривает:

- **Целевой потребитель** – руководители и сотрудники подразделений вуза; студенты, абитуриенты и их родители, которым не безразличен рейтинг их кафедры, факультета или вуза.

- **Ключевые потребности потребителей**

- Ключевая потребность руководителей подразделений вуза и профессорско-преподавательского состава – возможность провести анализ работы подразделения и собственной работы, выявить «узкие места».

- Ключевая потребность студента – наглядно увидеть чего добились его преподаватели.

- Ключевая потребность абитуриентов и их родителей – выбор подразделения для поступления на основании предоставленного рейтинга.

- **Ключевые возможности продукта**

- Разработка моделей расчета рейтинга для каждого учебного года на базе метода взвешенных сумм.

- Создание и редактирование структуры рейтинга (состав и структура критериев, веса критериев) подразделений вуза.

- Расчёт рейтинга подразделений по исходным данным с учетом их сопоставимости в каждой группе.

- Представление рейтинга в виде наглядных диаграмм и таблиц.

- Генерация отчетов.

- Для руководителей подразделений возможность перерасчёта рейтинга на странице подразделения с новыми исходными данными и весами критериев.

- Просмотр динамики работы подразделения за выбранное время.

- Удобный и интуитивно понятный интерфейс, требующий минимального времени на изучение

В [1] к системе оценки деятельности кафедр предъявляются такие требования:

1. Максимальная степень охвата всех сторон деятельности кафедр с учетом их значимости.

2. Возможность анализа деятельности кафедр с различной степенью детализации – от общих направлений до первичных показателей.

3. Сопоставимость показателей деятельности кафедр, имеющих различное назначение в учебном процессе, различную тематическую направленность и численность.

При проектировании и разработке модуля построения рейтинга кафедр в веб-приложении NooScore мы также придерживаемся этих требований. Так, для реализации первого требования составление рейтинга подразделений вуза будет осуществляться на базе метода взвешенных сумм (МВС), как было предложено в статье [2]. Согласно МВС модель составления рейтинга представляет собой древовидную иерархическую структуру критериев, входными данными которой являются нормализованные к выбранной шкале оценки подразделений по частным (первичным) критериям. Результатом является список объектов (подразделений в нашем случае), упорядоченных в порядке убывания их глобальных оценок. Это и есть общий рейтинг; рейтингом объекта называется место и глобальная оценка объекта в данном списке.

В системе NooScore разрабатывается возможность для каждого учебного года создавать свою модель расчета рейтинга. При этом, максимальное число уровней критериев – 7, а в каждой группе (ветви) до 20 критериев. Веса критериев могут задаваться вручную, также в качестве инструмента расчета весов пользователю системы будет предоставлена возможность рассчитывать их в СППР NooTron [3]. В СППР NooTron веса критериев в каждой группе можно рассчитать несколькими способами:

1) с помощью матрицы парных сравнений, в которой критерии сравниваются попарно по отношению к обобщающему критерию в шкале Саати [4] или в шкале отношений (интегрированный метод МВС+МАИ [2]);

2) методом ранжированных весов критериев, где критерии сначала ранжируются от 1 до N (N – количество критериев в группе), а затем для определения весов критериев применяется один из убывающих законов распределения (линейный закон, экспоненциальный закон, закон Ципфа-Парето, прогностический закон).

В NooScore для хранения моделей составления рейтинга в базе данных разработаны две таблицы: таблица моделей и таблица критериев.

Таблица моделей имеет такую структуру:

- id – идентификатор модели, первичный ключ;
- nl – количество уровней критериев в модели;
- hi – максимальный идентификатор критерия в модели;

- `t` – название таблицы, хранящей показатели подразделений для модели;
 - `ts` – флаг, указывающий, синхронизирована ли таблица показателей с текущей структурой критериев;
 - `desc_uk` – описание (название) модели на украинском языке;
 - `desc_ru` – описание (название) модели на русском языке.
- Таблица критериев имеет такую структуру:
- `mid` – идентификатор модели критерия;
 - `id` – идентификатор критерия внутри модели;
 - `key` – ключевое название критерия, используется как имя столбца таблицы показателей подразделений, в котором хранятся данные этого критерия;
 - `level` – уровень критерия, возрастает от корня;
 - `type` – тип критерия, указывает на тип узла дерева критериев, а также математику, используемую для создания этого критерия из дочерних критериев;
 - `parent` – идентификатор родительского критерия;
 - `weight` – вес данного критерия;
 - `desc_uk` – описание (название) критерия на украинском языке;
 - `desc_ru` – описание (название) критерия на русском языке;
 - Первичный ключ: (`mid`, `id`).

Для обеспечения возможности анализа деятельности кафедр с различной степенью детализации – от общих направлений до первичных показателей, на странице просмотра рейтинга подразделений предусматривается система фильтров, которая позволит анализировать результаты рейтинга в разных ветвях критериев, разных группах кафедр, также пользователь будет иметь возможность выбирать, какие кафедры отображать в рейтинге.

При работе с многокритериальными задачами результат решения необходимо выводить в таком виде, что бы он был как можно более читабелен, но в то же время, чтобы он был как можно более полным.

Для этого в веб-приложении NooScore наряду с привычными для пользователей диаграммами такими, как линейные (столбчатые) и круговые (секторные) диаграммы, будут использоваться радиальные. В отличие от линейных диаграмм, в радиальных или сетчатых диаграммах более двух осей. По каждой из них производится отсчёт от начала координат, находящегося в центре. Для каждого типа полученных значений создаётся своя собственная ось, которая исходит из центра диаграммы (рисунок 1). Радиальные диаграммы напоминают сетку или паутину, поэтому иногда их называют сетчатыми. Преимущество радиальных диаграмм в том, что они позволяют отображать одновременно несколько независимых величин (в нашем случае: критериев), которые характеризуют общий рейтинг.

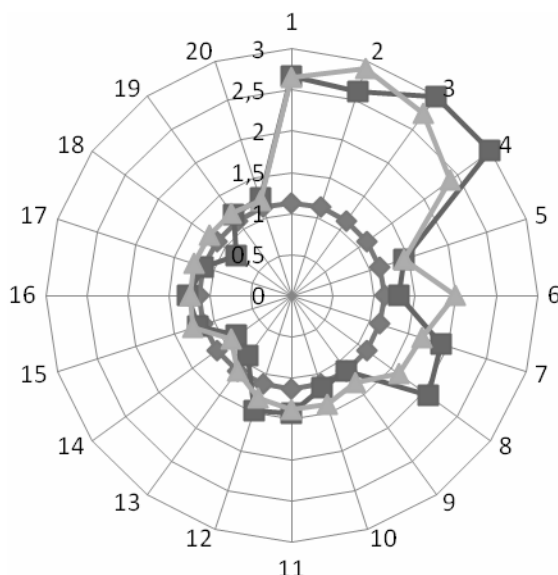


Рисунок 1 – Пример радиальной диаграммы

Для сайта NooScore работа диаграмм разрабатывается при помощи языка Java и библиотеки jQuery.

Разработка требований веб-приложения NooScore

Разработка требований, как и самого веб-приложения, проводится по современной гибкой методологии scrum [5]. Scrum – это набор принципов, на которых строится процесс разработки программного обеспечения. Она позволяет в жестко фиксированные небольшие промежутки времени предоставлять конечному пользователю работающее программное обеспечение с новыми возможностями, для которых был определен наибольший приоритет [6]. Согласно этой методологии требования оформляются в виде «product backlog». Product

backlog – это документ, содержащий набор пользовательских историй с определенными приоритетами.

При формировании требований к системе, мы выделили такие категории пользователей (роли): гость, кафедра, факультет, администратор. Затем, для каждой роли разработали пользовательские истории и определили их приоритеты. Вот основные истории из product backlog-«а» продукта:

- Как "Администратор" я могу редактировать модель составления рейтингов подразделений.
- Как "Администратор" я могу редактировать структуру подразделений вуза.
- Как "Администратор" я могу редактировать показатели подразделений.
- Как "Администратор" я могу просмотреть рейтинг кафедр вуза в выбранной группе за выбранный учебный год.
- Как "Кафедра" я могу просмотреть рейтинг кафедр вуза в выбранной группе за выбранный учебный год.
- Как "Факультет" я могу просмотреть рейтинг кафедр вуза в выбранной группе за выбранный учебный год.
- Как "Гость" я могу просмотреть рейтинг выпускающих кафедр вуза за выбранный учебный год.
- Как "Администратор" я могу просмотреть рейтинг факультетов вуза за выбранный учебный год.
- Как "Кафедра" я могу просмотреть рейтинг факультетов вуза за выбранный учебный год.
- Как "Кафедра" я могу в любом рейтинге выбирать тип представления.
- Как "Кафедра" я могу просматривать/печатать отчеты.
- Как "Кафедра" я могу пересчитать рейтинг с новыми показателями и/или с новыми весами критериев.
- Как "Факультет" я могу просмотреть рейтинг факультетов вуза за выбранный учебный год по выбранному направлению.
- Как "Факультет" я могу в любом рейтинге выбирать тип представления.
- Как "Факультет" я могу просматривать/печатать отчеты.

- Как "Факультет" я могу пересчитать рейтинг с новыми показателями и/или с новыми весами критериев.
- Как "Гость" я могу просмотреть рейтинг факультетов вуза за выбранный учебный год.

Выбор архитектуры веб-приложения NooScore

Любой современный сайт использует в своей работе систему управления содержимым (Content Manager System – CMS). Современные CMS позволяют создавать сайты различной сложности, как сайты-визитки, так и многофункциональные порталы. В системе управления содержимым могут находиться самые различные данные: документы, фильмы, фотографии, номера телефонов, научные данные и так далее. Такая система часто используется для хранения, управления, пересмотра и публикации документации. Контроль версий является одним из основных её преимуществ, когда содержимое изменяется группой лиц.

Перед началом разработки сайта, команде разработчиков (студентов-дипломников) необходимо было выбрать CMS. Выбор такой системы – достаточно важный шаг, так как от этого будет зависеть вся последующая работа. Это не просто сделать хотя бы потому, что CMS – это достаточно сложный программный продукт.

В настоящее время существует множество различных CMS: платных и бесплатных, универсальных и сугубо специальных, широко распространенных и разработанных web-студиями исключительно для собственного использования. Поэтому важно правильно подобрать критерии выбора системы управления для решения задач при разработке веб-приложения «Система расчёта рейтинга подразделений вуза NooScore».

Для начала мы определили, какие функции на сайте необходимы сейчас, и какие могут понадобиться в дальнейшем. Затем, представили себе набор взаимодействующих непосредственно с сайтом компонентов (хостинг-площадка, администратор сайта, пользователи сайта и поисковые системы), который возникнет после внедрения CMS.

Так, при создании сайта нам необходимо реализовать модуль построения рейтинга кафедр с использованием метода взвешенных сумм, произвести вывод графиков на экран, использовать для хранения данных СУБД MySQL, так же сайт должен обладать простым и

понятным интерфейсом. Просмотрев некоторое количество вариантов, решили остановиться на MODX.

MODX – это бесплатная профессиональная система управления содержимым (CMS) и фреймворк для веб-приложений, предназначенная для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления контентом сайтов [7]. MODX распространяется бесплатно по лицензии GPL с открытым исходным программным кодом (open source). Это означает, что систему MODX может использовать каждый: как для личного использования, так и для коммерческого распространения сайтов, построенных на данной системе управления. Система управления MODX может быть установлена на большинстве веб-серверов (например, таких как IIS, Apache, Lighttpd, nginx и Zeus), а контрольная панель системы работает практически во всех современных браузерах.

MODX обладает большим количеством встроенных средств, таких как: система регистрации пользователей, встроенный поиск на AJAX, система генерации меню сайта, система публикации комментариев (с модерацией и подпиской), генерация каталогов/блогов/новостей и т. п., короткие URL, поддержка модульной разработки и др.

Основными достоинствами CMS MODX являются:

- Полный контроль над выводом HTML-кода, разделение логики работы CMS и дизайна.
- Легкая расширяемость, возможность создавать программный код в сниппетах, модулях и плагинах, а также подключать параметры TemplateVariable (TV) для создания дополнительных полей.
- Поддержка AJAX, MooTools, prototype.
- Графический веб-установщик.
- Поддержка PHP 4.3.11 и выше.
- Кросс-браузерность и кросс-платформенность работы.

Выбрана версия MODX Revolution, которая полностью подходит для осуществления всех поставленных задач. Отметим, что на текущий момент это новейшая версия системы управления сайтами MODX.

Выводы

На основе предложенной концепции продукта (сайта NooScore) и согласно гибкой методологии scrum, выбранной для проектирования и разработки продукта, разработан product backlog – требования к сайту в виде пользовательских историй с определёнными приоритетами.

Проведен анализ систем управления содержимым сайтов (CMS) и, с учетом разработанных требований к продукту, в качестве базы для архитектуры веб-приложения NooScore была выбрана CMS MODX. Данная CMS является бесплатной профессиональной системой управления содержимым, предназначенной для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления контентом сайтов. MODX обладает большим количеством встроенных средств, упрощающих разработку.

Веб-приложение «Система ранжирования подразделений вуза NooScore» позволит кардинально уменьшить трудоёмкость скоринга, сделать процесс составления рейтинга прозрачнее и создаст возможности для его совершенствования с участием заинтересованных сторон. Руководители подразделений получают инструмент для анализа результатов и разработки стратегий повышения качества работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив: Учебное пособие. – СПб.: Издательство "Лань", 2009. - 272 с: ил.
2. Теплякова Г.Л. Модель построения рейтинга кафедр интегрированным многокритериальным методом МВС+МАИ // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (86). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 135-141.
3. Теплякова Г.Л., Кузнецов В.И., Михалев А.И. Система поддержки принятия решений NooTron: учебные и прикладные задачи // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2013): матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 13-16 березня 2013 року) / Міністерство освіти і науки України, Академія наук вищої школи України, Запорізька обласна державна адміністрація, Класичний приватний університет. – Запоріжжя: КПУ, 2013. – С. 248-249.
4. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
5. Книберг Х. SCRUM и XP: заметки с передовой: Пер. сообщества Agile Ukraine. – 94 с.
6. Scrum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Scrum>
7. О системе MODX CMS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://modx.ru/>

МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПУТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. В статье рассматривается метод оптимизации пути движения информации на предприятии в процессе ее обработки. Рассматриваются различные по своим свойствам источники, образующие информационные потоки. В расчеты введен коэффициент эффективности использования ресурсов предприятия.

Ключевые слова: информация, путь обработки, человеческий фактор, ресурсы, системный подход.

Введение

Проблема организации обработки информационных потоков наиболее рациональным образом стоит перед большинством компаний. Однако наиболее остро ощущают эту проблему те из них, чье производство связано с риском для жизни и здоровья людей или экологическими рисками. Практика показывает, что все крупные инциденты, произошедшие на таких объектах, в той или иной мере связаны с проблемами в организации информационного обмена между участниками производственного и бизнес процессов [1,2]. Вопросам оптимизации путей обработки и движения информации в последние десять лет уделяется много внимания. Объемы статьи не позволяют привести полный анализ всех литературных источников, но даже в последних публикациях [3-6] авторами, либо рассматриваются пути обработки деталей на конвейере, либо исследуется проблема оптимизации используемого на предприятии программного обеспечения. Авторы не рассматривают информацию как продукт, который производится предприятием наравне с основной продукцией. Не говорится о том, что от того насколько оптимально выбраны пути перемещения информации от ее источника к месту принятия решения зависит, как минимум, безопасность, которая является одним из показателей качества работы таких предприятий, как, например, атомные электростанции. Точность существующих моделей в значительной степени снижена из-за пренебрежения принципом эмерджентности, то есть, как участки обработки информации рассматриваются, либо только люди, либо только программно-аппаратные средства. Кроме того, не

принимается во внимание эффективность использования ресурсов информационной системы.

Цель работы

Разработать метод, позволяющий рассчитать оптимальный путь движения информации внутри предприятия, производственные процессы которого могут оказывать существенное влияние на жизнь и здоровье сотрудников. При этом информация поступает от разных по своей природе источников (люди, бумажные носители, электронные средства передачи информации) и учитывается эффективность использования ресурсов информационной системы. Таким образом, реализуется процесс системной оценки качества обработки информации.

Критериями оптимизации являются время обработки и достоверность информации. При этом под достоверностью будем понимать соответствие принятого сообщения переданному[7].

Основная часть

На вход информационной системы предприятия поступает разнородная по структуре и способу представления информация. Если каждую категорию представить в виде отдельного проекта, то проекты можно разбить на группы однотипных данных, для которых существует множество однотипных порядков обработки K , где k_p^z порядок обработки однотипных данных z -ой выборки $k_p^z \in K$, а z - номер множества однотипных данных $z = \overline{1, n}$. I - множество всех данных, n - количество множеств данных, n^z - количество элементов в множестве однотипных данных.

Выходы информационной системы представляют собой результат применения некоторого, заранее выбранного порядка обработки, к информации, которая поступила на входы системы. Таким образом, выходы могут быть представлены совокупностью

$$Y = \langle I, K \rangle, \quad (1)$$

где Y - множество выходов информационной системы.

С другой стороны, выходы информационной системы могут быть представлены в виде

$$Y = M_{in} \cup M_{out} \quad (2)$$

где M_{in} - множество внутренних выходов информационной системы, $m_{in}^j \in M_{in}$ элемент множества, который представляет результат обработки входной информации, используемый предприятием для собственных целей. Примером такого результата может быть обработка статистических данных о покупках продукции предприятия. Результаты обработки такой информации затем используются для работы внутренних подразделений предприятия.

M_{out} - множество внешних выходов информационной системы, $m_{out}^c \in M_{out}$ элемент множества, который представляет результат обработки входной информации, используемый предприятием для внешних целей. Например, ответ на запрос заказчика о технических характеристиках выпускаемой продукции.

В идеале выражение (1) должно быть равно выражению (2). Другими словами, на предприятии должно существовать такое количество порядков обработки входной информации, чтобы в любой момент времени можно было получить ответ на любой поставленный вопрос, т.е., сформировать любой требуемый в настоящий момент времени выход информационной системы. Однако такая стратегия не учитывает:

ресурсов предприятия и ограничений, которые налагаются на них в силу различных причин;

- структуру обработки информации;
- критериев эффективности использования ресурсов;
- ситуаций, связанных с отказами.

Пусть B - множество ресурсов информационной системы, требующихся ей для реализации всех порядков обработки информации из множества K . К ресурсам в данном случае можно отнести t_{ob} - время, которое потребуется на обработку информации; t_{pr} - время на переход от одного порядка обработки к другому; A - программно-аппаратные средства необходимые для обработки, хранения и передачи информации.

Сделаем следующее допущение. Структура исследуемой нами информационной системы иерархическая. Другими словами каждый элемент $k_p^z \in K$ сам представляет собой множество участков l_k , на ко-

торых происходит поэтапная последовательная обработка однотипных данных. Время обработки t_{ob} состоит из отдельных последовательно расположенных отрезков времени $t_{ob} = \sum_1^l t_{ob}^l$, при этом $t_{ob}^l > t_{ob}^{l-1}$. Таким образом, информация обрабатывается последовательно, переходя от одного участка конвейера (установленного порядка обработки) к другому. Общее время обработки t_{ob} не может превышать суммарное время обработки t_l на всех участках обработки l_k , которое определяется технологическими характеристиками используемого оборудования (быстродействие, пропускная способность канала связи, скорость передачи данных и т.п.). Автор не исключает из рассмотрения параллельную обработку частей одного и того же сообщения, если это не противоречит здравому смыслу и технологически возможно. Однако участки обработки будут располагаться последовательно друг за другом. Например, один и тот же документ могут одновременно изучать в юридической и экономической службах, но это происходит только после того, как директор направит этот документ в оба подразделения.

Множество A программно-аппаратных средств условно можно назвать конвейером, на котором проходит обработку входная информация. Порядок обработки определяется структурой конвейера. P - множество обрабатывающих программ. Под обрабатывающей программой будем понимать некоторый алгоритм действий. Тип обрабатывающей программы зависит от типа данных, для обработки которых предназначена эта программа. $P_o \in P$ - элемент множества состоящий из ряда действий сетевого и компьютерного оборудования, компьютерных программ и людей, направленных на обработку входных данных информационной системы и преобразование их в выходы этой системы. Каждому участку l_k , на котором происходит обработка однотипных данных, соответствует некоторый участок P_o^l обрабатывающей программы P_o . Соотношение между P_o^l и l_k определяется матрицей инцидентности D , которая представляет собой диагональную единичную матрицу. Элемент матрицы $d_{pl}=1$, так как каждой

части обрабатываемой программы P_o^l соответствует свой участок обработки l_k определенного порядка обработки однотипных данных k_p^z . По сути дела набор данных и набор программ составляют задание, которое необходимо обработать программно-аппаратными средствами по заранее определенному порядку обработки.

Программно-аппаратные средства как ресурс ограничены техническими и экономическими возможностями компании и биологическими возможностями людей, задействованных в данном процессе.

t_{pr} - время, которое необходимо на переход от порядка обработки k_p^z к порядку обработки k_p^y . Если $z=y$, то $t_{pr}=0$, так как переход не требуется. Время перехода ограничивается общим временем, отпущенным на обработку информации, особенностями технологического процесса и экономическими требованиями (это время не является продуктивным).

Таким образом, t_{tot} - общее время обработки информации, поступающей на вход информационной системы, складывается из двух составляющих t_{ob} и t_{pr} . Если переход от одного порядка обработки к другому не требуется, то $t_{tot}=t_{ob}$.

Общий ресурс системы может быть представлен в виде выражения (3)

$$B_{ud} = \{b_{ud}^g | g = \overline{1, q}\}, \quad (3)$$

где b_{ud}^g - ресурс одного элемента программно-аппаратного комплекса информационной системы; q - количество элементов комплекса.

На ресурсы налагаются определенные ограничения. Такие ограничения вызваны техническими, физическими или экономическими причинами. Пусть R_e множество ограничений, которые наложены на ресурсы информационной системы. Тогда

$$R_e = \{r_e^b | b = \overline{1, s}\}, \quad (4)$$

где r_e^b - ограничение, которое накладывается на ресурс; s - количество ограничений.

Множество ресурсов, доступных для использования информационной системой в процессе преобразования данных на входе в вы-

ходную информацию, является результатом прямого декартова произведения множеств из выражений (3) и (4)

$$B_{ud}^a = B_{ud} \times R_e = \{(b_{ud}^g; r_e^b) | b_{ud}^g \in B_{ud} \wedge r_e^b \in R_e\} \quad (5)$$

При этом для каждой пары элементов, полученных в результате выполнения выражения (5), реализуется отношение $(r_e^{b1}; r_e^{b2}) = \{b_{ud}^g | r_e^{b1} \leq b_{ud}^g \leq r_e^{b2}\}$, т.е. для каждого из ресурсов установлены не только наименования ограничений, но и конкретные значения их границ.

Данные поступают на вход системы, где сортируются и объединяются в группы однотипных данных. Затем для каждой группы устанавливается расписание обработки этих групп отдельными программами P_o . Наборы данных поступают на конвейер непрерывно и в зависимости от различных обстоятельств выстраиваются определенным образом на обработку. За формирование порядка таких очередей несет ответственность расписание. Количество таких расписаний составляет множество Tm_o . Однако исполнение расписаний зависит от ресурсов, которыми обладает информационная система и ограничений, которые налагаются на эти ресурсы. Другими словами, для того чтобы получить множество расписаний, которые действительно могут быть реализованы в условиях данной информационной системы, нам необходимо сопоставить между собой элементы множества Tm_o и множества B_{ud}^a и сформировать новое множество $Tm_{or} \subset Tm_o$. Основанием для помещения элементов в новое множество является наличие у системы ресурсов для реализации такого расписания.

В дальнейших рассуждениях будем учитывать, что, с одной стороны, на ресурсы информационной системы накладываются определенные ограничения, а с другой, ресурсы сами ограничивают процессы, происходящие в этой системе.

$$\langle I, K, B_{ud}^a \rangle = M_{in} \cup M_{out} \quad (6)$$

Таким образом, в расчет введены ресурсы предприятия и структура обработки информации. В модель введены ресурсы, что позволило превратить ее из статической в динамическую, так как процесс преобразования информации рассматривается на протяжении некоторого промежутка времени t_{tot} .

На следующем шаге введем в модель показатель эффективности использования ресурсов в процессе преобразования входов информационной системы в ее выходы. Тогда, между множествами B_{ud}^a и K должно быть реализовано следующее отношение

$$H = \{b_{udz}^a \in B_{ud}^a, k_p^z \in K \mid b_{udz}^a / k_p^z \leq 1\}, \quad (7)$$

где b_{udz}^a - ресурсы, необходимые информационной системе для обработки i_j набора однотипных данных на l_i участке k_p^z порядка обработки данных.

Учитывая (7) выражение (6) примет следующий вид

$$\langle I, H \rangle = M_{in} \cup M_{out} \quad (8)$$

Выводы

1. Выражение (8) представляет собой математическую модель, физический смысл которой заключается в том, что при правильно сбалансированных ресурсах и оптимально выбранном порядке обработки информации система сможет сгенерировать из информации, поступившей на вход, необходимый в данный момент времени элемент из множества выходов.

2. Так как в состав ресурсов входит общее время t_{tot} , то модель представляется динамической, т.е. описывающей развивающийся во времени процесс обработки информации. Динамика процесса обусловлена отклонениями от заданных порядков обработки K , которые могут быть вызваны сбоями в работе аппаратно-программного комплекса, в том числе и по вине человека.

3. Достоверность информации на выходе обеспечивается путем выбора адекватного порядка ее обработки из множества возможных порядков K .

4. В своих дальнейших исследованиях автор преобразовал выражение (8) в транспортную задачу и оптимизировал путь движения информации по параметру времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Report of the President's Commission on the Accident at Tree Mail Island. Washington, D.C., October 1979. - 179 p.
2. №75- INSAG-7 Чернобыльская авария: дополнение к INSAG -1. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности. МАГАТЭ, Вена, 1993.- 146с.
3. Зак Ю.А. Разбиение на подмножества и построение допустимых и оптимальных последовательностей выполнения множества заданий на нескольких машинах/Ю.А. Зак//Системні дослідження та інформаційні технології.- 2012.-№2.-С.87-101
4. 4. Баженов Н.А. Обеспечение качества формирования концептуальной модели требований к программному обеспечению/Н.А. Баженов, Б.Н. Соколов//Системні дослідження та інформаційні технології.- 2012.-№3.-С.7-18
5. Мазурок Т.Л. Интеллектуальные преобразования в реализации синергетической модели управления/Т.Л. Мазурок//Системные технологии.-2013.-№3.-С.72-79
6. Хамхотьюко А.Ф. Информационное обеспечение задач прогнозирования свойств щелочесодержащих шихтовых материалов доменной плавки/А.Ф. Хамхотьюко, А.И. Белькова, Н.А. Циватая, А.С. Скачко, Ю.М. Лихачев//Системные технологии. – 2013.-№2.-С.155-160
7. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки.-5-е изд. перераб. и доп.-М.:Дело, 2003. - 520с.

И.А. Дорош, М.Г. Снегирев, С.В. Тарасов
**РАЗРАБОТКА ТЕСТОВОГО СТЕНДА
ИНДУКЦИОННОГО ПОДВЕСА РОТОРОВ
РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОТУРБИН**

Аннотация. Рассмотрен вопрос применения одной из разновидностей системы индукционного подвеса роторов радиально-осевых ветротурбин. Разработан тестовый стенд для измерения параметров системы подвеса.

Ключевые слова. Системы магнитного подвеса, индукционный подвес, испытательный стенд.

Определенным недостатком традиционных систем магнитолевитирующих индукционных подвесов является малая подъемная сила при малых относительных скоростях магнитной системы и проводящего трека. Данная особенность существенна для систем подвеса роторов радиально-осевых ветротурбин, для которых предъявляются повышенные требования по увеличению подъемной силы и уменьшению сил сопротивления вращению при их раскрутке с неподвижного состояния [1].

Альтернативой указанному выше типу систем индукционного подвеса, в которых токи в проводящем треке создаются в результате его относительного движения в постоянном поле магнитной системы, являются системы индукционного подвеса, токи в проводящем треке которых создаются переменным во времени магнитным полем, создаваемым высокочастотным током в обмотке специального электромагнита. Данный вид систем подвеса обладает возможностью создавать существенную подъемную силу при малых и нулевых скоростях движения частей подвеса, при сохранении таких преимуществ индукционного подвеса как жесткость и устойчивость подвеса, а высокая частота изменения магнитного поля повышает его эффективность. Недостатком такой системы является необходимость наличия внешнего источника электропитания, что, однако, не является существенной проблемой для систем подвеса роторов ветрогенераторов.

Относительно малая исследованность этой разновидности индукционных подвесов, по сравнению с традиционными, делает актуальной задачу разработки и построения стенда для оценки эффективности и отладки отдельных элементов подвесов такого типа.

Одним из существенных элементов подвеса такого типа является высокочастотный источник питания электромагнита, эффективно работающий на индуктивную нагрузку и генерирующий выходной высокочастотный ток большой величины при относительно малом выходном напряжении. Наиболее привлекательным схемотехническим решением такого генератора будет резонансный генератор, нагруженный на колебательный контур [3-4]. Параллельный колебательный контур, включающий в себя электромагнит системы подвеса и блок конденсаторов, позволяет эффективно рекуперируют энергию магнитного поля электромагнита, что многократно повышает КПД устройства. Отношение действующего тока в электромагните к среднему току во внешней цепи при этом описывается выражением

$$I_L / I_{внеш} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (1)$$

где C – емкость батареи рекуперирующих конденсаторов, а L и R – индуктивность и сопротивление электромагнита подвеса. Таким образом, ток непосредственно в электромагните будет существенно выше тока в цепях блока питания, которые при этом должен будет лишь компенсировать омические потери в обмотке электромагнита.

Однако, данный вид источника питания не обладает гибкостью выходных параметров, требуемой для использования его в качестве стендового источника питания, применяемого при испытании широкого диапазона модельных систем индукционного подвеса. Поэтому, в качестве схемотехнического решения для стендового источника питания была избрана модификация резонансного источника – мостовой квазирезонансный источник питания. Он позволяет широко варьировать частоту и амплитуду выходного тока, при сохранении экономичности свойственной резонансным источникам питания [5].

Рассматриваемый стенд начального уровня состоит из квазирезонансного источника питания, набора тестовых электромагнитов и проводящих подложек.

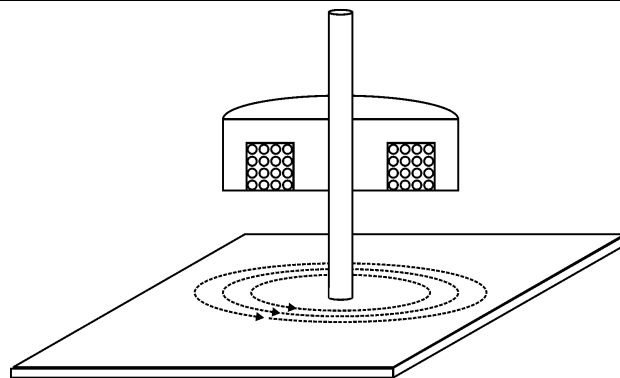


Рисунок 1

Тестовые электромагниты подключаются к источнику переменного напряжения и располагаются на заданной высоте над тестовой проводящей поверхностью (Рисунок 1). Подъемная сила системы определяется динамометрически, потери энергии в подвесе – путем измерения действующего значения тока в цепи электромагнита. Стенд позволяет получать модельные экспериментальные данные в широком диапазоне частот питающего напряжения и токах до 25 ампер и верифицировать проведенные ранее теоретические расчеты [2].

В качестве электромагнитов используются половинки ферромагнитных сердечников фирмы EPCOS типоразмеров PQ32 – PQ50 с проницаемостью 2000 – 2200 единиц и диаметром 3-5 см. Такие сердечники имеют достаточную магнитную проницаемость и малые потери в диапазоне до 100-200 кГц. Намотка катушки осуществляется медным проводом диаметром 0.3-1 мм.

В качестве проводящих подложек могут использоваться сплошные медные и алюминиевые проводящие листы, профилированные листы или наборы плоских замкнутых катушек.

Наиболее важной частью стенда является управляемый высокочастотный источник питания с микропроцессорным управлением. Он собран по мостовой квазирезонансной схеме и позволяет выдавать на индуктивные нагрузки переменное напряжение заданной частоты частоты 300-50000 герц, напряжением 7-20 вольт и током до 25 ампер, с возможностью его ограничения до заданной величины.

Блок питания состоит из силовой цифровой части, а также вспомогательных цепей. Силовая часть состоит из моста на полевых транзисторах IRL3715S, драйверов силовых ключей IR2110 и батареи рекуперационных конденсаторов, набранных из 10 пленочных SMD конденсаторов емкостью 10 мкф, максимальным напряжением 50 В и

максимальным пиковым током 3.25 А, а также двух электролитических конденсаторов 1000 мкф 50 В с низкий внутренним сопротивлением, предназначенным для уменьшения переходных процессов в цепи вход-блок конденсаторов. Величина пикового тока в цепи катушки контролируется отдельным резистором-шунтом.

Основой цифровой части блока питания является микроконтроллер PIC16F688 фирмы Microchip. Он осуществляет управление ключами моста, задание нужной частоты переключения плеч силового моста и ограничение пикового тока через электромагнит [6]. Тактовая частота микропроцессора задается кварцевым резонатором частотой 20 МГц. Частота выходного напряжения и величина пикового тока задается двумя потенциометрами. Дополнительно предусмотрен переключатель режимов работы и ожидания, режим работы индицируется светодиодом. Блок питания подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения 7-20 вольт и максимальным током 5 ампер.

После подачи внешнего питания, микроконтроллер выполняет процедуру инициализации и настройки оборудования, и при включенном выключателе SW1 переходит в режим работы. В этом режиме, он попеременно подключает выводы тестового электромагнита к банку конденсаторов. При этом, ток в катушке электромагнита меняется как

$$I_L(t) = I_0 + \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right), \quad (2)$$

где t - время прошедшее от начала текущего цикла. Установившееся пиковое значение точки в катушке электромагнита составляет

$$I_{Lmax} = \pm \frac{U}{2R} \left(1 - e^{-\frac{R}{2fL}}\right), \quad (3)$$

где f - заданная частота выходного напряжения, задаваемая оцифровкой напряжения потенциометра. При достижении времени конца цикла, производится переключение плеч моста, при этом энергия запасенная в магнитном поле тестового электромагнита не рассеивается, а возвращается в рекуперационные конденсаторы. Ток проходящий через катушку создаёт падение напряжение на шунте, которое сравнивается с референсным напряжением потенциометра. При превышении напряжения над референсным, микропроцессор производит

переключение плеча моста, ограничивая таким образом пиковый ток через электромагнит и ключи моста. При переводе переключателя режима работы в выключенное состояние микропроцессор переходит в режим ожидания, при этом выводы электромагнита через ключи закорачиваются на нулевой провод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов С.В. Магнитолевитирующий подвес роторов вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье на базе массива Хальбаха / С.В. Тарасов, М.Г. Снегирев, И.А. Дорош // Техническая механика. – 2010. – №1. – с. 94-103.
2. Дорош И.А. Разработка алгоритма и программного средства для расчета параметров магнитного поля магнитного подвеса энергетической установки / И.А. Дорош, М.Г. Снегирев, С.В. Тарасов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2011. – №5(76). – с.84-90
3. Hong Huang, Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter, Texas Instruments, 2011
4. Ya Liu, High Efficiency Optimization of LLC Resonant Converter for Wide Load Range, Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2007
5. Мэк Р., Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению , 2008.
6. Болл Р., Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров, М:2007.

СОДЕРЖАНИЕ

Rakhmanov S.R.

Nonlinear vibrations of profile press mandrel of tube-press machine 3

Журавлев В.Н., Борзов С.А., Попчёнков А.В., Кабак В.С.

Частотная модель коэффициента турбулентности пламени камеры сгорания ГТД..... 13

Прядко Н.С., Саксонов Г.М., Терновая Е.В.

Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья..... 19

Шевелёва А.М.

Исследование плоской дозвуковой струи, истекающей из локальной щели на пластину 26

Басс К.М., Кривда В.В.

Определения оптимальных уклонов карьерных автодорог по времени транспортного процесса 33

Белозеров В.Е., Зайцев В.Г.

Нелинейный рекуррентный анализ в обработке временных рядов ... 42

Кныш Л.И.

Расчёт проектных параметров теплового аккумулятора с фазовым переходом «твёрдое тело – жидкость» 50

Миргород В.Ф., Деренг Е.В., Гвоздева И.М.

Интервальная оценка трендовой компоненты временных рядов 57

Пинчук В.А.

Определение коэффициента теплопроводности водоугольного топлива методом комбинирования физического эксперимента и математического моделирования 66

Сарычев А.П.

Исследование методом статистических испытаний итерационной процедуры для идентификации параметров системы авторегрессионных уравнений 77

Семененко Е.В., Никифорова Н.А., Татарко Л.Г.

Расчет параметров гидротранспорта многокомпонентных твердых материалов с существенным различием в плотности частиц в присутствии гидродинамически активных веществ 90

Чумаков Л.Д., Черная А.А.

Оценка эффективности эксплуатации технической системы в составе системы управления запасами при непрерывном контроле ее исправности с помощью математической модели для периодического контроля 99

Шарабура Т.А.

Математическое моделирование процессов газификации и сжигания водоугольного топлива в циклонном предтопке 104

Кузнецов В.И., Евтушенко Г.Л., Гайдуков И.В., Гаращенко С.А., Левченко Д.А., Светличный А.Д.

Система ранжирования подразделений вуза NooScore 116

Гущин И.К.

Метод расчета оптимального пути обработки информации 126

Дорош И.А., Снегирев М.Г., Тарасов С.В.

Разработка тестового стенда индукционного подвеса роторов радиально-осевых ветротурбин 134

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.774.35 (078.5)

Рахманов С.Р. **Нелінійні коливання голки профільного преса трубопресової установки** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.3 - 12.

Вирішена задача про нелінійні коливання технологічного інструмента в процесі пресування труб. Встановлені динамічні переміщення різних точок голки в умовах непереривного обтікання потоком метала для обраного спектра параметрів процесу пресування.

Бібл. 10.

УДК 621.45.022.5

Журавлев В.Н., Борзов С.А., Папченков А.В., Кабак В.С. **Частотная модель коэффициента турбулентности пламени камеры сгорания ГТД** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.13 - 18.

Предложена и экспериментально исследована частотная модель сигнала турбулентного горения, которая определяет энергию турбулентного потока в камере сгорания. Модель чувствительна к параметру мощности сигнала пульсаций турбулентной скорости на интервале времени активности пламени в объеме жаровой трубы и параметрам вибрационного горения в диапазоне вероятных частот.

Бібл. 8.

УДК 622.73

Прядко Н.С., Саксонов Г.М., Тернова К.В. **Імітаційна модель замкнутого цикла подрібнення мінеральної сировини** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.19 - 25.

Описано модель замкнутого цикла подрібнення мінеральної сировини на основі дискретно - подійному підході моделювання стохастичних динамічних процесів. Показана можливість урахування технологічних особливостей замкнутої схеми тонкого подрібнення. Визначено величину показника над здрібнювання та проаналізовано вплив фракційного складу матеріалу на продуктивність млина. Розроблений програмний комплекс протестовано на результатах струминного подрібнення шлаків.

Бібл. 3.

УДК 622.73

Шевельова Г. М. **Дослідження плоскої дозвукового струменя, що витікає з локальної щілини на пластину** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.26 – 32.

Досліджено характеристики плоского повітряного струменя, що витікає з локальної вузької щілини у затоплений простір на поверхню пластини. Розглянуто ряд методик теоретичних розрахунків профілів швидкості струменя. Одержані теоретичні характеристики струменя було порівняно з експериментальними даними. Результати розрахунків швидкості на центральній осі початкової області струменя знаходяться у доброму узгодженні. Виявлено відмінність характеристик струменя, що витікає з вузької щілини в

безкінечних простір та на поверхню пластини. Досліджено безрозмірний профіль швидкості та показано його афінність.

Бібл. 3.

УДК 622.271

Бас К.М., Кривда В.В. **Визначення оптимальних ухилів кар'єрних автодоріг за часом транспортного процесу** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.33 – 41.

Аналіз дослідження сумарного часу руху автосамоскиду у вантажному і порожньому напрямі, а також технологічної швидкості руху базується на методі дослідження продуктивності кар'єрного автосамоскида і значенням оптимальних ухилів кар'єрних автодоріг за часом транспортування гірничої маси.

Бібл. 5.

УДК 681.876.2

Білозьоров В.Є., Зайцев В.Г. **Нелінійний рекурентний аналіз у обробці часових рядів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.42 – 49.

Розглядаються основні положення та можливості обробки часової інформації за допомогою методів рекурентного аналізу. Надаються напрямлення його розвитку та використання для аналізу реальних процесів.

Бібл. 5

УДК 621.311

Книш Л.І. **Розрахунок проектних параметрів теплового акумулятора з фазовим переходом «тверде тіло – рідина»** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.50 – 56.

Проведено дослідження низькотемпературного трубчато – ребристого теплового акумулятора фазового переходу «тверде тіло – рідина». Складено математичну модель для розрахунку основних геометричних, динамічних та теплофізичних параметрів акумулюючого модулю. В моделі використався наближений квазістаціонарний метод розрахунку швидкості руху границі розділу фаз. Особливістю моделі є врахування конвективної складової в рідинній фазі теплоакumuлюючого матеріалу. Чисельний розв'язок дозволив виявити, що швидкість руху границі розділу фаз на режимі зарядки є сталою. Визначено час зарядки акумулятора при вибраній добовій потребі теплоти.

Бібл.5, іл.1.

УДК 004.942

Миргород В.Ф., Деренг Є.В., Гвоздева І.М. **Інтервальна оцінка трендової компоненти часових рядів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.57 – 65.

У роботі обґрунтовується підхід до інтервальної оцінки трендової компоненти часових рядів, утворених параметрами реєстрації стану силових і енергетичних установок в їх

тривалій експлуатації. Для багатовимірних масивів даних послідовно використовуються відомі методи сингулярного спектрального і трендового аналізу. Вирішено завдання інтервальної оцінки трендової компоненти для часового ряду з лінійним трендом.

Бібл. 9, іл. 2.

УДК 536.2.08

Пінчук В.А. **Визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива методом комбінування фізичного експерименту та математичного моделювання** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.66 – 76.

Показана можливість комбінованого використання натурального експерименту та математичного моделювання у вирішенні теплофізичних задач. Для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива використана комбінація методу порівняння і чисельного розв'язання зворотної задачі теплопровідності. В якості методу чисельного рішення зворотної задачі теплопровідності був обраний метод багаторазового розв'язання прямої задачі теплопровідності з оптимізацією ітерацій методом золотого перетину. Результати визначення значень коефіцієнта теплопровідності зразків водовугільних палив запропонованим методом в діапазоні зміни температури 40-150 оС показали, що коефіцієнт теплопровідності водовугільних палив змінюється від 0,41 до 0,82 Вт/м·К в залежності від марки вихідного вугілля, закономірно збільшуючись з ростом температури в досліджуваному діапазоні.

Бібл. 11, іл. 5.

УДК 519.25

Саричев О.П. **Дослідження методом статистичних випробувань ітераційної процедури для ідентифікації параметрів системи авторегресійних рівнянь** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.77 – 89.

Досліджено ітераційну процедуру методу параметричної ідентифікації для задач моделювання об'єктів із багатовимірним виходом у класі систем авторегресійних рівнянь, у яких випадкові адитивні складові у вихідних змінних, як у законі функціонування, так і в моделі спостереження об'єкта, можуть бути статистично залежні, а множини вхідних змінних у рівняннях можуть бути різними. Ефективність ітераційної процедури підтверджена методом статистичних випробувань.

Бібл. 9.

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

Семененко Є.В., Никифорова Н.А., Татарко Л.Г. **Розрахунок параметрів гідротранспорту багатокомпонентних твердих матеріалів з суттєвою відмінністю густини частинок в присутності гідродинамічно активних речовин** // Системные техноло-

гии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.90 – 98.

Запропоновано нові залежності для визначення гідравлічного ухилу та критичної швидкості гідротранспортування багатокомпонентних твердих матеріалів з суттєвою відмінністю густини частинок в присутності гідродинамічно активних речовин. Запропоновано розбиття частинок матеріалу на тонкі та дрібні фракції не за геометричним розміром, а за їх гідравлічною крупністю. Отримано обмеження на параметр Архімеда частинок тонких фракцій, яке дозволяє розділити геометрично тонкі фракції на тонкі та гідравлічно дрібні.

Бібл. 21, іл. 3.

УДК 62.519.2

Чумаков Л.Д., Чорна А.А. **Оцінка ефективності експлуатації технічної системи у складі системи управління запасами при безперервному контролі її справності за допомогою математичної моделі для періодичного контролю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.99 – 103.

Обговорюються питання оцінки величини ефективності експлуатації технічної системи на етапі її розробки за наявності ієрархічної системи управління запасами.

Бібл. 1.

УДК 51-74:662.7

Шарабура Т.А. **Математичне моделювання процесів газифікації та спалювання водовугільного палива в циклонному предтопку** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.104 – 115.

Наведено методику математичного моделювання при використанні програмного пакету "SigmaFlow", який дозволяє описувати процеси аеродинаміки і теплообміну при термічній переробці палив. При моделюванні враховані особливості горіння та газифікації водовугільного палива і використовувалися кінетичні константи і значення енергій активації, які найбільш повно описують реальний процес переробки палива. У результаті моделювання процесів газифікації та спалювання водовугільного палива в циклонному предтопку з горизонтальною віссю циліндричних камер отримані температурні поля і поля концентрацій вугільних частинок по перерізу предтопку, а також склади продуктів термічної переробки.

Бібл. 18, іл. 4, табл.1.

УДК 669.168

Кузнецов В.І., Євтушенко Г.Л., Гайдуков І.В., Гаращенко С.А., Левченко Д.О., Светлічний А.Д. **Система ранжування підрозділів вузу NooScore** // Системные техноло-

гии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.116 – 125.

Розглядається розробка вимог до системи розрахунку рейтингу підрозділів вузу на основі методу зважених сум. Розроблюваний веб-додаток «Система ранжування підрозділів вузу NooScore» дозволить не тільки, зменшити трудомісткість скорингу, але і зробити процес складання рейтингу прозорішим.

Бібл. 7, іл. 1.

УДК 658.5

Гущин І.К. **Метод розрахунку оптимального шляху обробки інформації** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.126 – 133.

Проаналізований існуючий досвід оптимізації інформаційного простору підприємства. Отриман висновок про те, що існуючі методи не задовільняють вимогам системного підходу. Запропонована нова методика, яка враховує як програмно-апаратну складову інформаційного простору, так і людський чинник. Розроблена транспортна модель, яка містить коефіцієнт ефективності використання інформацій.

Бібл. 7.

УДК 004.021

Дорош І.О., Снегірьов М.Г., Тарасов С.В. **Разработка тестового стенда индукционно-го подвеса роторов радиально-осевых ветротурбин** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (92). - Днепропетровск, 2014. - с.134 – 138.

Розглянуто питання, що представляють інтерес при розробці системи індукційного підвісу роторів радіально-осьових вітротурбін. Пропонується стенд, який розроблений для вимірювання параметрів системи підвісу. Наведено схема і параметри стенду.

Бібл. 6.

UDC 621.774.35 (078.5)

Rakhmanov S.R. **Nonlinear vibrations of profile press mandrel of tube-press machine** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.3 - 12.

The problem about nonlinear variations of technological tool in the process of extrusion of tubes has been solved. Dynamic relocations of different points of mandrel in conditions of continuous flow-around by flow of metal for chosen spectrum parameters of the process extrusion have been decided.

Bibl. 10.

UDC 621.45.022.5

Zhuravlev V.N., Borzov S.A., Papchenkov A.V., Kabak V.S. **Frequency coefficient of turbulence model combustor flame GTD** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.13 - 18.

Proposed and experimentally investigated the frequency of the signal of turbulent combustion model, which determines the energy of the turbulent flow in the combustion chamber. Model is sensitive to the parameter of the signal power of the turbulent velocity fluctuations in the time interval in the volume of activity of the flame and the flame tube vibration combustion parameters in the range of possible frequencies.

Bibl. 8.

UDK 66.096.5

Pryadko N., Saksonov G.M., Ternovaya E.V. **Imitating model of the mineral grinding closed cycle** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.19 - 25.

The closed cycle model of the mineral grinding on the basis of discretely - event modeling of stochastic dynamic processes is described. The opportunity of the technological features account of the closed fine grinding circuit is shown. The value of an over grinding parameter is determined and influence of fractional material structure on mill productivity is analyzed. The program complex is tested on the results of slag jet grinding.

Bibl. 3.

UDK 622.73

Shevelyova A.M. **Research of the flat subsonic jet discharging from a local slot on a surface** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.26 - 32.

Flat air jet characteristics discharging from a local narrow slot in submerged on a plate surface are investigated. Some theoretical calculations techniques of jet speed structures are considered. The received theoretical jet characteristics were compared to experimental data. Results of speed calculation on the central axis of a jet initial area are in good adjustment. Characteristic differences of jet discharging from a narrow slot in infinite space and on a plate surface are revealed. The dimensionless jet structure is investigated and it is shown its similarity.

Bibl. 3.

UDK 622.271

Bass K.M., Krivda V.V. **Determine the optimum pit slope road of transport process time** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.33 - 41.

Analysis of the total study time traffic dump trucks the empty and cargo station as well as speed the process based on the method performance studies determining optimal career dump slopes career road time rock mass transportation.

Bibl. 5.

UDC 681.876.2

Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G. **Nonlinear recurrence analysis in treatment of time series** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.42 - 49.

In the article basis foundation and possibilities of treatment of time information by the help recurrence analysis are considered. Directions of a development of the recurrence analysis and it use for the real processes are specified.

Bibl. 5

UDC 621.311

Knysh L.I. The calculation of design parameters of heat storage module with change phase «solid phase – liquid» // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.50 - 56.

The research of low-temperature pipe – finned of heat storage module with change phase «solid phase – liquid» was conducted. The mathematic model for calculation main geometrics, dynamics and heat parametric of heat storage module compiled. In model approximate quasi-stationary method was used for calculation of velocity movement of line change phase. The feature of model is account of convection in liquid phase of heat storage material. The numerical solution allowed to reveal constancy of velocity movement of line change phase at changing regime. The time of accumulator charging under selecting daily heat usage was defined.

Lib. 5, fig.1.

UDK 004.942

Mirgorod V.F., Dereng E.V., Gvozdeva I.M. **The interval estimation of time series trend components** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.57 - 65.

The approach to interval estimation of trend components of time series, that are formed by registration parameters of power plants states in their continuous service, is offered in this paper. For the multidimensional data arrays the known methods of singular spectral and trend analysis are used. The problem of trend component interval estimation for time series with linear trend is solved.

Bibl. 9, il. 2.

UDC 536.2.08

Pinchuk V.A. **Determination of thermal conductivity of coal-water fuel by combining physical experiments and mathematical modeling** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.66 - 76.

The possibility of the use of full-scale experiment in combination with mathematical modeling for solving thermal problems is shown. For the thermal conductivity of coal-water fuel determination it is used combination of the comparison method and the numerical simulation of the inverse heat conduction problem. The numerical solution of inverse heat

conduction problem was carried out by multiple numerical solutions of direct heat conduction problem. Optimization of iterations was carried out with the golden section search.

The values of the thermal conductivity of samples of coal-water fuels by the proposed method in the temperature range from 40 to 150 ° C are obtained. It is shown that the thermal conductivity of coal-water fuels varies from 0.41 to 0.82 W/m · K, depending on the grade of the original coal, and it increases within the temperature range investigated, as expected.

Ref. 11, fig. 5.

UDC 519.25

Sarychev A.P. **Research of the iterative procedure for identification of parameters of the autoregressive equations system by method of statistical tests** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.77 - 89.

The iterative procedure of the method of parametrical identification for tasks of modelling of objects with a multivariate output in a class of systems of autoregressive equations is investigated. Casual additive components in output variables, both in the law of functioning and in model of observation of object, can be statistically dependent, and sets of input variables in the equations can be various. Efficiency of iterative procedure is confirmed with a method of statistical tests.

Bibl. 9.

UDK 622.648.01 – 9:621.643.29

Semenenko Eu.V., Nykyforova N.A., Tatarko L.G. **Calculation of hydrotransport parameters of multicomponent solid materials with substantial difference in density of particles in the presence of drag reducing agents** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.90 - 98.

The new dependences for determination of hydraulic gradient and critical velocity for hydrotransportation of multicomponent solid materials with substantial difference in density of particles in the presence of drag reducing agents are offered. The clustering of material particles to fine and medium fractions taking into account not their geometrical, but hydraulic size is offered. The restriction on Archimedes parameter is obtained, which allows clustering of geometrically fine fractions to fine and hydraulically medium classes.

Bibl. 21, ill. 3.

UDK 62.519.2

Chumakov L.D., Chornaja A.A. **Calculation of hydrotransport parameters of multicomponent solid materials with substantial difference in density of particles in the presence of drag reducing agents** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.99 - 103.

Estimates of the efficiency of operation of technical system during its development in the presence of a hierarchical system of inventory management are discusses.

Bibl. 1.

UDC 51-74:662.7

Sharabura T.A. **Mathematical modeling of gasification and combustion of coal-water fuel in a cyclone furnace extension** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.104 - 115.

The technique of mathematical modeling using the software package "SigmaFlow", which allows to describe processes of aerodynamics and heat transfer in the thermal processing of fuels is adduced. In the simulation takes into account features of combustion and gasification of coal-water fuel and the kinetic constants and activation energies that best describe the actual process of reprocessing used. The simulation processes of gasification and combustion of coal-water fuel in a cyclone pre-furnace with a horizontal axis of cylinders obtained the temperature fields and concentration fields of coal particles in the cross section pre-furnace, as well as compositions of products of thermal processing.

Ref: 18 items, fig. 4, Tabl. 1.

UDC 669.168

Kuznetsov V.I., Evtushenko G.L., Gaidukov I.V., Garashchenko S.A., Levchenko D.A., Svetlichniy A.D. **The ranking system of the university's units NooScore** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.116 - 125.

The requirements design of the ranking system of the university's units based on SAW is considered. The develop of the web-application «The ranking system of the university's units NooScore» will not only reduce the complexity of scoring, but also make the process of rating transparent.

Refs. 7, ill. 1.

UDC 658.5

Gushchyn I.K. **Calculation method for the optimal path of information processing** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.126 - 133.

Existing experience of the enterprises' information field optimization was analysed. The conclusion is made that the existing methods don't meet the requirements of systematic approach. New method taking into account software, hardware and human factor as parts of the information field is suggested. The transport model including efficiency factor for information resources utilization is developed.

Refs. 6.

UDC 004.021

Dorosh I.O., Snegirev M.G., Tarasov S.V. **Development Testbed induction rotor suspension Francis wind turbines** // System technologies. N 3(92) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.134 - 138.

The questions which are of interest at system engineering induction suspension of rotors of radially-axial wind turbines are considered. The stand which is developed for measurement of parametres of the suspension system is offered. The scheme and stand parametres are resulted.

Refs. 6.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Рахманов Сулейман Рахманович – Національна металургійна академія України.

Журавлев Владимир Николаевич – зам. нач. Управления информационных технологий, д-р тех. наук, Запорожье, Украина.

Борзов Сергей Анатольевич – ведущий конструктор отдела камер сгорания, руководитель группы жаровых труб, Запорожье, Украина

Папчёнков Александр Викторович – зам. технического директора по новым изделиям АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Кабак Владислав Семёнович – доцент каф. радиотехники Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Прядко Наталия Сергеевна – старший научный сотрудник Института технической механики НАНУ и НКА Украины, к.т.н.

Саксонов Геннадий Михайлович – старший преподаватель кафедры программного обеспечения компьютерных систем ВУЗ «Национальный горный университет».

Терновая Екатерина Витальевна – инженер Института технической механики НАНУ и НКА Украины.

Шевелева Анна Михайловна – аспирант Института технической механики НАНУ и НКА Украины.

Басс Константин Маркович - к.т.н., доцент, заведующий каф. Автомобилей и автомобильного хозяйства Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет».

Кривда Виталий Валерьевич - аспирант каф. Автомобилей и автомобильного хозяйства Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет».

Білозьоров Василь Євгенович - д.ф.-м.н., профессор, ДНУ імені О.Гончара, ФПМ, кафедра комп'ютерних технологій.

Зайцев Вадим Григорович – к.ф.-м.н., доцент, ДНУ імені О.Гончара, ФПМ, кафедра комп'ютерних технологій.

Кныш Людмила Ивановна – д.т.н., доцент, профессор кафедры аэрогидромеханики и энергомассопереноса Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Миргород Владимир Федорович - ведущий научный сотрудник АО “Элемент”.

Деренг Евгения Владимировна - аспирантка Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины.

Гвоздева Ирина Маратовна - профессор Национальной металлургической академии Украины.

Пинчук Валерия Александровна – к.т.н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины, кафедра промышленной теплоэнергетики.

Сарычев Александр Павлович – д.т.н., старший научный сотрудник, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, ведущий научный сотрудник отдела системного анализа и проблем управления.

Семененко Евгений Владимирович - д.т.н., с.н.с., заведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Никифорова Нина Анатольевна - к.т.н., доцент, доцент кафедры теории металлургических процессов и общей химии Национальной металлургической академии Украины.

Татарко Лариса Гавриловна - старший преподаватель кафедры Физики Украинского государственного химико-технологического университета.

Чумаков Лев Дмитриевич – зав.кафедрой Специализированных компьютерных систем ДГБУЗ "УГХТУ" д.т.н., старший научный сотрудник.

Черная Алла Александровна - магистр кафедры Специализированных компьютерных систем ДГБУЗ "УГХТУ".

Шарабура Татьяна Андреевна – ассистент каф. «Промышленная теплоэнергетика», Национальная металлургическая академия Украины.

Кузнецов Владимир Иванович - к.т.н., с.н.с., доцент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Евтушенко Галина Львовна - аспирант кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Гайдуков Иван Викторович - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Гаращенко София Андреевна - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Левченко Дмитрий Александрович - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Светличный Андрей Дмитриевич - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Гущин Игорь Константинович - аспирант, Севастопольский национальный технический университет, кафедра Информационных систем.

Тарасов Сергей Васильевич - к.т.н., ст. научный сотрудник, зав. отдела №3 Института транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг».

Снегирев Максим Георгиевич - к. физ.-мат. н., ст. научный сотрудник отдела № 3 Института транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг».

Дорош Игорь Александрович - мл. научный сотрудник отдела № 3 Института транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг».