



UDK 621.095

M.J. Bergander

Magnetic Development, Inc., Madison, CT, USA

S.D. Карыева, M.T. Torekhanova

Eastern Kazakhstan Technical University, Ust Kamenogorsk, Kazakhstan

**DEVELOPMENT OF HEAT DRIVEN REFRIGERATION CYCLE FOR POST-HARVEST STORAGE
OF FRUITS AND VEGETABLES**

В работе представлены экспериментальное и численное исследование системы инжектора хладагента, предназначенного для кратковременного хранения фруктов и овощей. Авторы представляют идею инжектора на основе системы охлаждения, которая 1) использует солнечную энергию или энергию отходов (ниже температуры 100 °С) в качестве основного источника энергии, 2) исключает механический компрессор, который является основным потребителем электроэнергии и 3) работает без каких-либо последствий истощения озонового слоя и всех выбросов парниковых газов, неизбежных в случае использования природных хладагентов.

Жұмыста жеміс пен көкөністерді қысқа мерзімде сақтауға арналған хладагент инжекторы жүйесіне эксперименттік және сандық зерттеулер ұсынылған. Авторлар суыту жүйесі негізіндегі инжектор идеясын ұсынады, олар: негізгі энергия көзі ретінде күн энергиясын немесе қалдықтарды (100° С төмен) пайдаланады; электр энергиясының негізгі тұтынушысы болып табылатын механикалық компрессорды пайдаланбайды және табиғи хладагенттерді пайдаланған жағдайда сөзсіз болатын озон қабатының тозуы және барлық буланған газдар шығарындылары ешқандай салдарсыз.

The paper describes experimental and numerical investigation of ejection refrigeration system dedicated for short time storage of fruits and vegetables. Authors present a new, ejector based refrigeration system that 1) utilizes solar or waste heat (below 100 °C temperature) as a main source of energy, 2) eliminates the mechanical compressor, which is a main user of electricity and 3) operates without any ozone depletion effects and any greenhouse gas emissions, when used with natural refrigerants.

One of the crucial problems in retail market of perishable foodstuff is a lack of efficient and appropriate refrigerated storage capacity for short time storage of food products. Existing refrigeration technologies contribute to environment pollution, consume a large amount of electricity and in general are expensive and in many cases even unaffordable to a small rural, retail business. Also, ensuring the required storage conditions in terms of the stability of the product temperature and humidity may be thought as a challenge for most of the existing short time storage refrigerators. The above is the reason for large amount of losses of the perishable foodstuff under retail market conditions, especially in rural areas.

The technology for refrigerated storage presented in this paper may be applied even in areas without access to electricity so it may provide an attractive solution to protect agricultural production from diseases and pests. It maybe considered as a step towards better food accessibility to vulnerable populations as well as to increase shelf life of many food products. It will have especially broad application for cooling in the field before the product is shipped to the market or storage warehouse (this is often referred to as “precooling”). Some highly perishable products such as broccoli, ripe tomatoes, carrots, leafy vegetables, strawberries, peaches, and plums must be cooled as soon as possible after harvesting and therefore filed refrigeration becomes an utmost importance.

The fundamental condition for good storage of most vegetables and fruits is to keep them in a steady state temperature. Only a few percent of vegetable and fruit mass is called dry matter and the rest is water. This is the reason why most of vegetables lose very easily moisture if they are kept in too dry air. Some of the foodstuff requires moderate storage conditions for short time storage in retail market, e.g. temperature/relative humidity $+5 - +12\text{ }^{\circ}\text{C} / 85\div 90\%$ (Gross et al, 2002, Mazza, 1989). However, without access to the appropriate storage equipment e.g. cooling chambers, the quality of the food products strongly decreases (Mizera and Butrymowicz, 2011).

In this paper, a solar-powered cooling system is considered for small-to-medium size warehousing facilities, capable for cooling and cold storage of agricultural products that require moderate temperature range, i.e. $4\div 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. This includes a wide variety of fruits and vegetables, eggs, milk and dairy products, baked products, etc. It is expected that a line of refrigeration units will be developed and manufactured in various sizes, i.e. from 1 to 5 tons of refrigeration. The schematic and a corresponding p-h graph for this thermodynamic cycle is shown in Fig. 1. The ejection refrigeration system is applied in the solar cooling chamber. The ejection system is a fully thermal driven system therefore either solar or waste heat with temperatures well below $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be utilized as energy source.

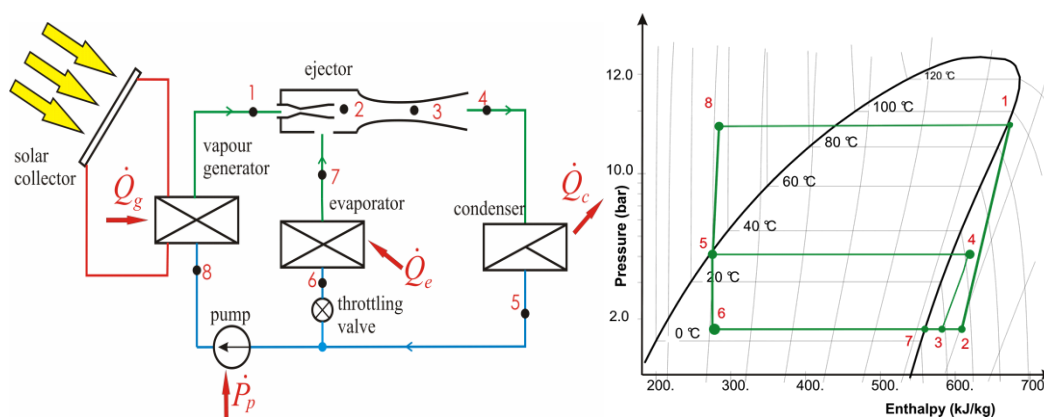


Figure 1 - Schematics of the solar cooler (left) and corresponding p-h diagram of thermodynamic cycle

A liquid refrigerant is passed through the pump to the generator (point 8). It is then heated in the generator either by energy from solar panels or waste heat. The first stage of heating produces saturated vapor (point 1), which can be further heated to produce superheated vapor. The vapor enters the motive nozzle of the ejector and undergoes expansion from the generator pressure p_g , to the evaporation pressure p_e (point 2). The ejector sucks vapor flowing from the evaporator (point 7), mixes it with expanded vapor (point 2) with the result being the mixed vapor in state 3. The pressure of the working fluid initially rises slightly as a result of momentum exchange, and then rises more in the diffuser up to the point 4, achieving the condensation pressure p_c . Compressed vapor enters the condenser where it condenses and may also sub-cool depending on the cooling conditions in the condenser. The working fluid leaves the condenser in the liquid state (point 5). It is then divided into two parts: one part flows to the generator through the small circulating pump. Meanwhile, the remaining part flows through the expansion valve to the evaporator, where it is throttled to the evaporation pressure, p_e , achieving the condition of wet vapor (point 6). Through boiling in the evaporator, the working fluid absorbs cooling capacity, Q_e , from the refrigerant (Bergander, 2015).

The part of an experimental rig with fabricated ejector is shown in Fig. 2 and it was designed

to operate on isobutane (Butrymowicz et al., 2009). The geometry of the tested ejector is presented in Fig. 3. The motive nozzle throat diameter was $D_t = 3.5$ mm. Other important factors of ejector geometry are: $D_m/D_t = 1.71$, $L_m/D_t = 23.4$, $L_d/L_m = 0.84$, $\alpha_1 = 8^\circ$ and $\alpha_2 = 10^\circ$. The testing stand was equipped with the temperature sensors and pressure transducers installed at all locations of interest. The Coriolis mass flow meters with accuracy of 0.15% were used.

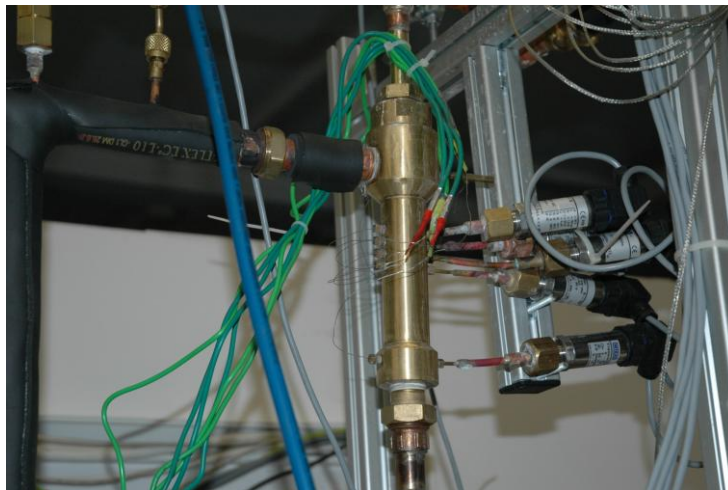


Figure 2 - Ejector installed on the testing stand

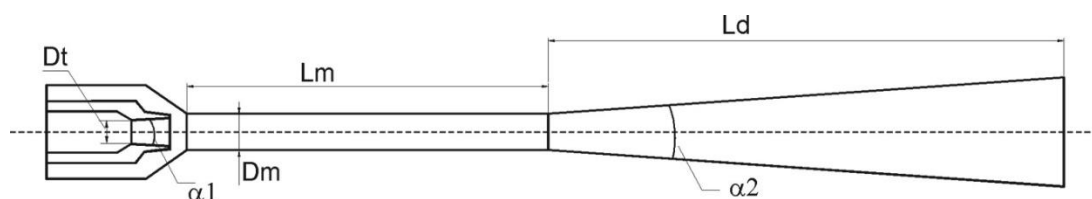


Figure 3 - Geometry of the tested ejector

The test rig was equipped with two additional loops: the first one for the thermal load for the evaporator and another for the condenser cooling. These systems allow for adjusting refrigerant flow rates as well as for changing of operation parameters in wide range. The condenser cooling system was equipped with an automatically controlled dry cooler. The thermal load system was equipped with automatically controlled electrical heater. The stand is also equipped with control valves enabling the adjustment of the operating parameters of the motive vapor at the inlet to the motive nozzle of the ejector. Standard data acquisition facility was used based on commercially available systems. The first one was a real time, Compact Field Point system, designed for industrial control. The second was modular SCXI system. This system logs all main parameters and controls valves, pumps, electric heaters and safety system. The computer uses a LabVIEW version 8.6.1 software with additional toolkits. In addition, software dedicated to experimental stand is capable to receive on-line data from software REFPROP, (Lemmon et al. 2013). The real time measurements are shown on the computer screen while all measured data are stored in a data file. During the experiments 100 readings at the steady-state conditions were taken and averaged to make one experimental run, shown in Table 1.

Table 1

Operating parameters of the ejector

Runs	Unit	Run 1	Run2
pressure of motive vapor p_g	MPa	1,27	0,95
superheating of motive vapor ΔT_g	K	10,0	8,0
saturation temperature of motive vapor t_{gs}	°C	77,0	63,7
suction pressure p_e	MPa	0,21	0,20
superheating of suction vapor ΔT_e	K	6,5	5,9
saturation temperature of evaporation t_{es}	°C	9,1	7,0
backpressure p_c	MPa	variable 0,35 – 0,44	variable 0,33 – 0,43
saturation temperature of condensation t_{cs}	°C	variable 25,1 – 33,1	variable 22,8 – 32,0

The experimental investigation were conducted in two runs. The evaporation temperature was kept constant, $t_{el} = 9.1$ °C and $t_{eII} = 7.0$ °C. The condensation temperature was varied between approximately $t_c = 23 \div 33$ °C. The motive stream temperature at saturation condition was set as $t_{gl} = 77$ °C and $t_{gII} = 63.7$ °C for two runs, respectively.

Superheating of the secondary stream was $\Delta T_e = 6.5$ K for Run No. 1, and $\Delta T_e = 5.9$ K for Run No. 2. Superheating of the motive vapor was $\Delta T_g = 10$ K for Run No. 1, and $\Delta T_g = 8$ K for Run No. 2. The system efficiency COP is calculated as the ratio of the cooling capacity \dot{Q}_e to the thermal energy \dot{Q}_g delivered to the vapor generator and motive power of the mechanical liquid pump P_p :

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + P_p} \quad (1)$$

Motive power of liquid refrigerant pump is calculated as the product of the mass flow rate of refrigerant and the change of the specific enthalpy at the both sides of the pump:

$$P_p = \dot{m}_g (h_8 - h_5) \quad (2)$$

In general, the motive power of the refrigerant pump is in most cases very small, usually 1÷2 percent of the thermal energy delivered to the generator and therefore can be omitted. Nevertheless this power was included in present investigations. Experimental results for Run No. 2 are presented in Fig. 4 and 5. Entrainment ratio U is defined as motive to secondary mass flow rates ratio, and compression ratio Π is defined as ratio of the pressure lift produced by the ejector to the difference between motive pressure and suction pressure.

The COP of the system as a function of condensation temperature shows that at $t_c < 30$ °C, ejector operates at on-design mode and COP is constant at 0.15 then starts to decrease as condensation temperature rises above 30°C. For on-design operating regime, the mass entrainment ratio is at 0.19 and starts to decrease for condensation temperatures over 30°C. This relationship is illustrated in Fig. 5.. It is seen that Run No. 2 covers both on-design and off-design conditions. The maximum reported compression ratio is $\Pi = 0.30$ and corresponds to $U = 0.15$.

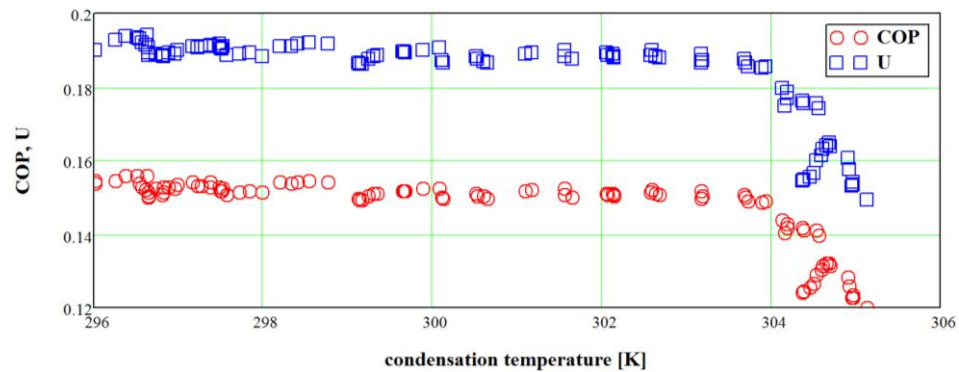


Figure 4 - Coefficient of performance (COP) and mass entrainment ratio (U) versus condensation temperature for Run No. 2

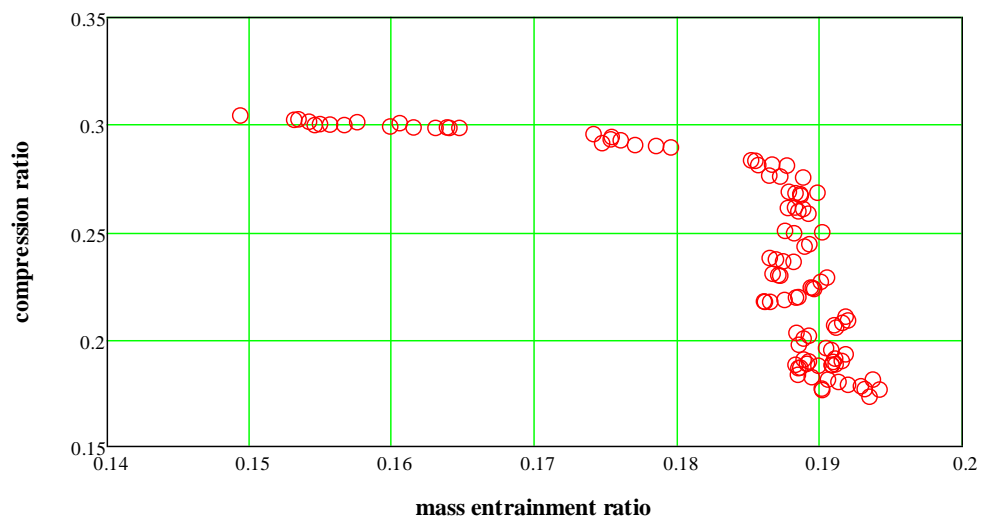


Figure 5 - Performance line of the ejector $\Pi = f(U)$ for Run No. 2

Considering the general goal being experimental verification of the stable operation of the ejector under required operation conditions, the manufacturing of an ejector prototype with required accuracy is essential. For that purpose, special fabrication technology (Kapayeva, 2012) to assure high accuracy and close tolerances was used. In addition, the main goal in this stage of research was the evaluation of the design procedure rather than estimation of the maximum capacity of the ejector. This required CFD calculations for one proposed geometry in order to analyze the operation of the ejector in the whole range of the operation parameters (Smierciew et al., 2010a,b). The compression process by the shock wave should be also analyzed on the basis of the numerical calculations results along with predicted pressure profile produced inside the ejector. The ejector geometry as shown in Fig. 3 was analyzed by means of CFD modeling.

The numerical calculations were carried out with use of ANSYS FLUENT 14. Two numerical models were built, namely:

2D axi-symmetric model that was discretized by means of structural mesh with the density 46 612 cells (48 931 nodes);

3D model (Fig. 6), discretized by means of structural mesh with the density 42 714 cells (50 800 nodes).

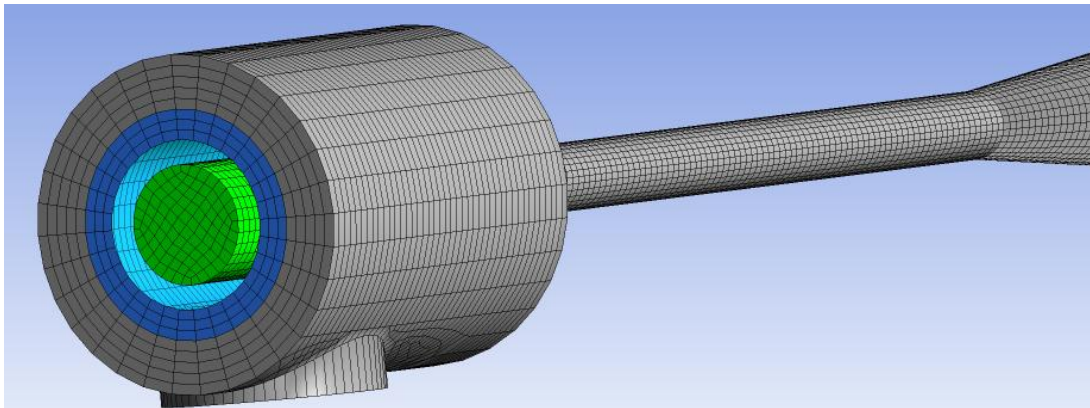


Figure 6 - Calculation mesh for the case of 3D model of the ejector

The numerical calculations were carried out using SST turbulence model that belongs to family of $k-\omega$ as well as $k-\varepsilon$ *realizable* models. The standardized wall function was applied for the case of $k-\varepsilon$ model along with default model constants for both of the above models. The velocity and pressure distributions were calculated with application of *coupled* algorithm. The discretization scheme *second order* of the type *upwind* were chosen. Numerical calculations were carried out for the operating conditions corresponding to the experimental values – specifically the ejector being is powered (motivated) with superheated vapor at the average temperature of 60°C.

Calculations results obtained for 3D in Table 2. As seen, a reasonably good agreement between the prediction and experimental data is achieved in terms of the pressure distribution.

Table 2

Numerical predictions compared with experimental data for 3D model, Run No. 2

p_{g_exp} bar	p_{g_CFD} (total/static) bar		p_{e_exp} bar	p_{e_CFD} (total/static) bar		p_{c_exp} Bar	p_{c_CFD} bar
9,3784	9,187	9,178	1,99	1,995	1,99	3,7529	3,7529
t_g [°C] 75,53			t_e [°C] 12,44			t_c [°C] 53,99	
m_{g_exp} [kg/s]	m_{g_CFD} [kg/s]	$\frac{CFD - EXP}{EXP} \cdot 100\%$	m_{e_exp} [kg/s]	m_{e_CFD} [kg/s]	$\frac{CFD - EXP}{EXP} \cdot 100\%$		
0,0269	0,0262	2,3175	0,0052	0,0067	-29,3642		

The static pressure distributions along the length of the ejector for two analyzed cases of 3D model are presented in Figure 7 below. The location of the shock wave compression is clearly visible. Note that the compression in the diffuser may be thought as only a supplementary since vapor compression in the analyzed ejector is obtained mainly by a shock wave. For all CFD calculations, the properties of real vapor were applied according to NIST thermodynamic and thermo-kinetic properties models.

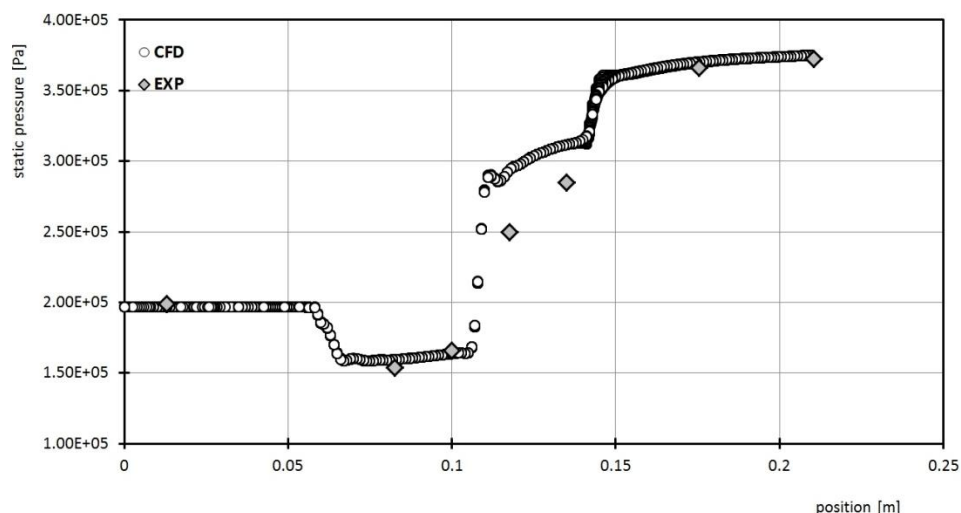


Figure 7 - Static pressure distribution on the ejector wall for the test Run No. 2 (see Table 2)

As a result of previous cycle modeling (Smierciew et al. 2009), along with presented here CFD analysis of the ejector operation - confirming a reliable ejector operation over wide range of operating conditions -plus systematic experimental investigations, authors were able to perform a preliminary design and component selection for the ejection refrigeration unit. The configuration of the prototype is shown in Figure 8 below. The required surface area of thermal solar collectors for 3 kW of cooling power is approx. 10 m². The adequate amount of electric power to drive the liquid pump can be supplied by less than 1 m² of photovoltaic panel surface.

to solar panels (heat source)

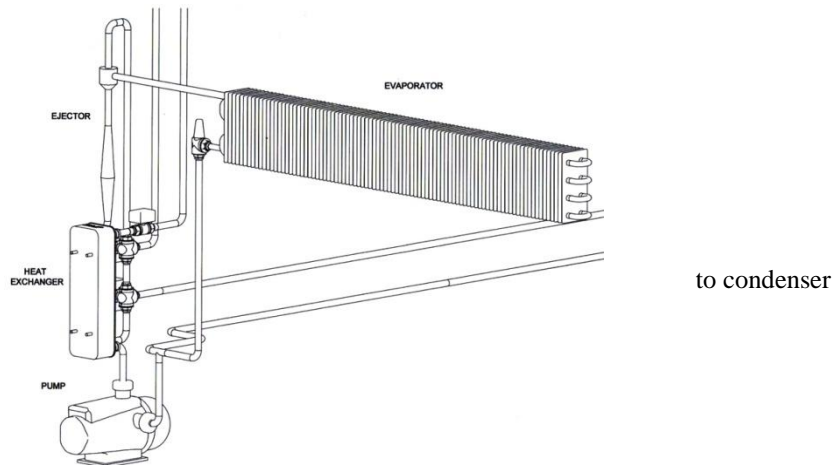


Figure 8 - Configuration of solar cooling system prototype

The described research addresses a refrigeration concept that uses low quality heat (below 100 °C), either solar or waste as energy source without need for electricity from power grid and does not pollute the environment. A significant energy saving is realized by a modified

thermodynamic cycle that pressurizes liquid instead of vapor. Extensive laboratory tests and CFD modeling were conducted in order to provide the design background for effective cooling system prototype for post-harvest precooling and field storage of fruits and vegetables. There is also a great potential of using this technology for refrigeration and air-conditioning in the Third World countries and in remote areas where electric energy is unavailable. Small solar-based units can be developed for storage of medicines, perishable food, and to cool field clinics.

Significant progress has been achieved in developing a methodology to design ejector geometry capable to adjust the cooling system to varying load conditions. The three-dimensional CFD modeling followed by extensive laboratory experiments had clearly demonstrated a reliable ejector operation under a broad range of changing load and power input. Further, out of many refrigerants under consideration, it was found that isobutane provides highest efficiency and, being a natural substance does not pollute the environment. With technical feasibility being fully confirmed, it can be reasonably expected that an attractive commercial product will emerge.

References:

1. Butrymowicz, D., Trela, M., Karwacki, J., Ochrymiuk, T., Smierciew K. (2009). Investigation and modeling of ejector for air-conditioning system, *Archives of Thermodynamics* 29 (4), 27-40.
2. Bergander M., (2015) Ejector Refrigeration Cycles: Classification of Thermodynamic Cycles with Ejectors, *Handbook of Res. on Adv. and Appl. in Refrigerat. Systems and Technologies*, Ch. 1, pp. 1-36, IGI Global 2015,
3. Gross, K.C., Wang, C.Y., Saltveit, M. (Eds.) (2002) *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks*, Agricultural Handbook No. 66, USA, Washington DC.
4. Huang, B.J., Chang, J.M., Wang, C.P., Petrenko, V.A. (1999). A 1-D analysis of ejector performance, *International Journal of Refrigeration* 22, 354–364.
5. Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., 2013, NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1, NIST
6. Mizera, G., Butrymowicz, D. 2011. Cold store of new generation for carrot storage, *Proceeding of 23rd International Congress of Refrigeration*, Prague, Paper No. 829.
7. Mazza, G., 1989, Carrots, in: Eskin N.A.M. (ed.), *Quality and Preservation of Vegetables*, CRC Press, 75-119.
8. Smierciew, K., Kolodziejczyk, M., Butrymowicz, D. (2010). CFD modelling of ejector operating with isobutane (in Polish), *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna* 17 pp. 434-438.
9. Smierciew, K., Butrymowicz, D., Karwacki, J., Trela, M., (2009) Modeling of ejection cycle for solar air-conditioning, *Proc. of Int. Seminar on ejector/jet-pump technology*, Louvain-La-Neuve, Belgium, Paper No. 25.
10. Bergander M., Butrymowicz D., Smierciew K., Gagan J., Kapayeva S.D Experimental Investigations of Low-Temperature Driven Ejector for Isobutane. *Proc. of 2016 Purdue Conference on Refrigeration and Air-Conditioning*, June 11-14 2016, West Lafayette, IN, USA.

Получено 13.08.2018

УДК 740:159.9:612.8

**Г.Б. Галиева, Ж.О. Ахметов, А.Д. Джанкулдукова, А.М. Маусумбаева,
Е.А. Данабеков, К.К. Килыбаев, Т. Мухаметали**

Жетысуский государственный университет им. И. Жансугурова, г.Талдыкорган

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ
ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ТРЕНИРОВОЧНОГО
ПРОЦЕССА**

Нами было изучено функциональное состояние 45 спортсменов обоего пола (средний возраст 20,2 года) высокой квалификации и различной спортивной специализации – студентов 1-4 курсов факультета физической культуры и искусства специальности «Физическая культура и спорт» Жетысуского государственного университета им. И. Жансугурова и воспитанников областной школы-интерната для одаренных в спорте детей.

Жансугуров атындағы Жетісу мемлекеттік университетінің дене шынықтыру және өнер факультетінің «Дене шынықтыру және спорт» мамандығының жоғары білікті және спорттық мамандануы әртүрлі 45 спортшының - 1-4 курс студенттерінің ұлдары мен қыздарының (орташа жастары 20,2 жас) және спорттағы дарынды балаларға арналған облыстық мектеп-интернатының тәрбиеленушілерінің функционалдық жағдайы зерттелді.

We have studied the functional condition of 45 athletes of both sexes (middle age 20.2 years) of high qualification and various sports specialization - 1st and 4th year students of the Faculty of Physical Culture and Arts of the specialty physical culture and sports of Zhetysu State University. I. Zhansugurov and pupils of the regional boarding school for gifted children in sports.

В настоящее время разработано большое количество практических рекомендаций для различных видов спорта по построению тренировочного процесса на начальных этапах подготовки спортсменов (1 и 2 этап). При этом наблюдается нехватка подобных разработок для последующих этапов подготовки спортсменов (углубленной тренировки и спортивного совершенствования). В то же время именно для этих этапов подготовки характерны повышенные и максимальные тренировочные нагрузки. Также на 3 и особенно на 4 этапе подготовки спортсменов возрастает необходимость индивидуализации тренировочного процесса [1-4]. Однако многие исследователи индивидуализации в спорте отмечают, что данный вопрос сталкивается с рядом объективных проблем [5-7].

Во-первых, как отмечалось выше, на практике редко производится комплексная оценка адаптационного потенциала спортсменов с учетом психофизиологических, функциональных и др. особенностей организма. Во-вторых, спортсмены, как часть социума, находятся под воздействием социальных факторов, которые оказывают значительное влияние на формирование психоэмоционального статуса. Поэтому индивидуализация подготовки спортсмена даже в спорте высших достижений представляется исключительно сложной задачей.

Нами было изучено функциональное состояние 45 спортсменов обоего пола (средний возраст 20,2 года) высокой квалификации и различной спортивной специализации – студентов 1-4 курсов факультета физической культуры и искусства специальности «Физическая культура и спорт» Жетысуского государственного университета им. И. Жансугурова и воспитанников областной школы-интерната для одаренных в спорте детей. Все спортсмены были разделены на 3 группы: 1 группа – занимающиеся видами спорта, развивающими скоростно-силовые качества (дзюдо, 15 человек); 2 группа – спортсмены игровых видов спорта, тренирующиеся на выносливость (футбол, 15 человек); 3 группа – спортсмены, развивающие силовые качества (тяжелая атлетика, 15 человек). Все спортсмены прошли обязательное плановое медицинское обследование, на основании которого

были отнесены в группу «практически здоровых», не имеющих противопоказаний для повышенных физических нагрузок.

Цель исследования: изучить особенности психологического и функционального состояния высококвалифицированных спортсменов в подготовительном, соревновательном и переходном периодах тренировочного процесса.

В связи с поставленной целью были проведены комплексные исследования. Для оценки уровня функционального состояния обследуемых был использован метод анализа вариабельности ритма сердца (ВРС). Исследования проводились на всех этапах тренировочного процесса.

У обследуемых тяжелоатлетов начало предсоревновательного и соревновательного этапов зависело от индивидуальных графиков участия в соревнованиях, поэтому данные этапы начинались у разных атлетов в разное время. Соревновательный этап у футболистов продолжался до конца периода обследования в текущем году. У всех обследованных дзюдоистов тренировочные этапы проходили одновременно: подготовительный – до апреля, предсоревновательный – апрель-май, соревновательный – июнь-август, восстановительный – с сентября. Поэтому в большинстве представленных результатов мы делаем ссылку на обследование дзюдоистов, т.к. вся обследуемая группа находилась в одинаковых условиях.

На примере обследования высококвалифицированных дзюдоистов можно проследить динамику изменений показателей ВРС на различных этапах тренировочного процесса (в подготовительном, соревновательном и переходном периодах). Полученные результаты представлены в табл. 1, из которой видно, что уже к концу подготовительного периода наблюдается снижение ЧСС на 4,3%, вегетативного показателя ритма (ВПР) на 15,40%, рост индекса вегетативного равновесия (ИВР) на 18,30% и адекватности процессов регуляции (АПР) на 19,30%. Величина индекса напряженности (ИН) по окончании подготовительного периода выросла на 20,30%. Показатели RRNN, SDNN и CV также увеличились. Данные изменения связаны с усилением активности парасимпатического отдела вегетативной регуляции и снижением симпатического влияния. Все это свидетельствует о перестройке деятельности сердечно-сосудистой системы на более экономичный режим за счет снижения центрального влияния регуляторных механизмов. Показатели мощности высокочастотных колебаний (HF) по окончании подготовительного периода увеличились на 14,7%, а показатели низкочастотной составляющей спектра (LF) повысились на 8,3%, что свидетельствует о высоких адаптационных возможностях к повышенным физическим нагрузкам, характерным для данного периода тренировочного процесса.

На соревновательном этапе наблюдается картина снижения показателей функционального состояния и рост симпатических влияний (по сравнению с предсоревновательным периодом), что связано с чрезмерно высокой эмоционально-психологической и физической нагрузкой, связанной с особенностями спортивных единоборств. Показатели HF по окончании соревновательного периода уменьшились на 7,7% на фоне роста соотношения LF/HF, что связано с усилением симпатических влияний. Данные изменения характеризуют состояние утомления. В то же время в переходный период наблюдается быстрое восстановление функционального состояния, связанное с выраженным усилением парасимпатических влияний (снижение показателей ВПР и ИН на фоне роста ИВР и АПР). По сравнению с соревновательным периодом отмечается рост показателей RRNN (на 6,60%); SDNN (на 6,70%); CV (на 7,70%).

Таблица 1

Показатели ВРС высококвалифицированных дзюдоистов на различных этапах тренировочного процесса (n= 15)

Показатель ВРС	Этап тренировочного процесса			
	Подготовительный	Предсоревновательный p1 – p2	Соревновательный p1 – p2 p1- p3	Переходный p1 – p2 p1- p3 p1 – p4
ЧСС (уд/мин)	65,54±1,45	62,73±1,32 ***	64,51±1,33 ** ***	60,32±2,78 **** **** ****
ИВР (y.e.)	65,21±5,44	77,14±4,89 ***	70,19±4,12 ** ***	78,75±5,18 **** ** ****
ВПР (y.e.)	0,52±0,04	0,44±0,06 ****	0,46±0,08 * *	0,40±0,04 **** ** **
АПР (y.e.)	18,74± 1,01	22,33±1,56 ****	19,72±1,3 ** ***	22,41±2,16 **** * ***
ИН (y.e.)	30,66±2,43	36,87±3,56 ****	39,48±3,19 **** **	32,87±5,98 * * ****
RRNN (мс)	1012,53±18,6	1054,81±19,4 ***	1027,64±36,5 ** ***	1095,46±25,7 **** **** ***
SDNN (мс)	85,41±4,32	89,76±3,66 ***	85,32±3,87 ** ***	91,18±4,81 **** ** ***
CV(%)	7,47±1,22	8,13±1,64 ***	7,41±0,33 * ***	7,98±0,27 ** ** ***
HF (y.e.)	0,34±0,03	0,39±0,04 ****	0,36±0,03 ** ***	0,41±0,04 **** * ****
LF (y.e.)	0,123±0,02	0,133±0,03 ****	0,121±0,02 ** ***	0,135±0,01 **** * ****
LF/HF(%)	0,35±0,01	0,33±0,02 ***	0,35±0,01 ** ***	0,31±0,03 * * ****
* - p>0,5; ** - p>0,05; *** - p<0,05; **** - p<0,01				

Также наблюдается рост показателей мощности высокочастотных (HF) и низкочастотных (LF) колебаний (на 13,90 и 11,60% соответственно); соотношение LF/HF уменьшилось на 11,40%. Наблюдаемое в переходном периоде преобладание парасимпатического отдела свидетельствует о совершенствовании механизмов регуляции сердечного ритма. Это подтверждает указанное выше положение об экономизации механизмов регуляции сердечной деятельности (поскольку изменения всех показателей оставались в пределах нормы) и свидетельствует о повышенных адаптационных способностях организма высококвалифицированных спортсменов. Основным показателем эффективности спортивной деятельности является результативность. В связи с этим нами также проводился анализ показателей функционального состояния высококвалифицированных спортсменов с учетом успешности их соревновательной деятельности. В табл. 2 представлены данные статистического анализа показателей ВРС у футболистов, показавших в текущем сезоне высокие и удовлетворительные результаты (по оценке тренера), в подготовительном и соревновательном периодах.

Спортсмены, успешно выступившие на соревнованиях, продемонстрировали повышение адаптационных возможностей в период соревнований (уменьшение индекса напряжения и амплитуды моды, увеличении моды и вариационного размаха). Обратная картина наблюдается у спортсменов, показавших в соревновательный период низкий или удовлетворительный результат. Выявленные особенности (рост индекса напряжения, снижение моды и вариационного размаха) свидетельствуют о росте напряжения регуляторных механизмов с выраженным преобладанием симпатических влияний, что характерно для состояния утомления. Выявленные отличия наблюдались, начиная с предсоревновательного периода, однако достоверные различия были обнаружены только в ходе соревновательного периода. Таким образом, показатели ВРС могут быть использованы для отбора наиболее подготовленных высококвалифицированных спортсменов к участию в ответственных соревнованиях в случае динамического наблюдения в подготовительном и предсоревновательном периодах. При этом наибольшую информативность показатели ВРС (для достоверного прогнозирования спортивной результативности у высококвалифицированных спортсменов) приобретают только в соревновательный период.

Таблица 2

Показатели ВРС у футболистов, показавших высокие и удовлетворительные результаты на различных этапах тренировочного процесса

Показатель ВРС	Этап тренировочного процесса			
	подготовительный		соревновательный	
	высоко- результативные спортсмены	низко- результативные спортсмены p1 – p2	высоко- результативные спортсмены	низко- результативные спортсмены p1 – p2
Мода	0,79±0,02	0,80±0,03 *	0,89±0,03	0,71±0,04 ***
Амплитуда моды	38,3±1,5	37,9±1,1 *	37,2±1,8	51,4±1,9 ***
Вариационный размах	0,22±0,01	0,23±0,01 *	0,31±0,02	0,21±0,02 ****
Индекс напря- жения (у.е.)	35,5±1,8	40,2±3,1 **	32,5±2,1	94,8±5,6 ****
* - p>0,5; ** - p>0,05; *** - p<0,05; **** - p<0,01				

Поскольку уровень физических нагрузок в предсоревновательный период равнозначный (а нередко и превышает) уровню физических нагрузок в соревновательный период, показанные нами изменения именно в соревновательный период вероятно можно объяснить эмоционально-психологическим напряжением данного периода, который достаточно сложно смоделировать на подготовительном этапе тренировочного процесса. В связи с этим возрастает роль диагностики и контроля психологического и психофизиологического состояния высококвалифицированных спортсменов на различных этапах тренировочного процесса.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для высококвалифицированных спортсменов в ходе тренировочного процесса характерна перестройка деятельности сердечно-сосудистой системы на более экономичный режим за счет снижения центрального влияния регуляторных механизмов изменения (усиление активности парасимпатического отдела вегетативной регуляции и снижением симпатического влияния).

2. В подготовительном периоде функциональное состояние сердечно-сосудистой системы высококвалифицированных спортсменов характеризуется активацией парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. В соревновательный период наблюдается активация симпатического отдела нервной системы и напряжение регуляторных механизмов, что связано с увеличением объема психоэмоциональных и физических нагрузок. Время восстановления парасимпатических влияний в переходный период свидетельствует об уровне адаптационных возможностей организма.

3. Для успешно выступивших спортсменов характерно повышение показателей адаптационных возможностей в период соревнований. У менее успешных спортсменов в соревновательный период наблюдается рост напряжения регуляторных механизмов с выраженным преобладанием симпатических влияний.

4. Рост скорости сенсомоторного реагирования приводит к увеличению уровня напряжения регуляторных механизмов, в первую очередь за счет снижения активности парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (без учета спортивной результативности).

Список литературы:

1. Зайцева В.В. Индивидуальный подход в физическом воспитании и его реализация на основе компьютерных технологий: Учеб. пособие для студ., магистрантов и аспирантов РГАФК / В.В. Зайцева, В.Д. Сонькин, С.И. Изаак. - М.:РГАФК, 1998. - 84 с.
2. Запорожанов В.А. Индивидуализация — важная проблема спорта высших // Теория и практика физической культуры. - 2002. - № 7. - С. 62-63.
3. Зеличенко В.Б. Легкая атлетика: критерии отбора / В.Б. Зеличенко, В.Г. Никитушкин, В.П. Губа. - М.: Терра-Спорт, 2000. - 240 с.
4. Ильин Е.П. Психология индивидуальных различий. - СПб.: Питер, 2004. - 701 с.
5. Ильин М.А. Технология применения специально-подготовительных упражнений в спортивной тренировке юных бегунов на короткие дистанции: автореф. дис... канд. пед. наук / Михаил Алексеевич Ильин. - М.: ВНИИФК, 2002. - 27 с.
6. Ионов Д.П. Анализ бега спринтеров / Д.П. Ионов, Г.П. Черняев // Легкая атлетика. - 1971. - № 8. - С. 18-19.
7. Иссурин В. Концепция блоковой композиции в подготовке спортсменов высокого класса / В. Иссурин, В. Шкляр // Теория и практика физической культуры. - 2002. - № 5. - С. 2-5.

Получено 13.08.2018

УДК 004.93

М.М. Искакова, О.Е. БаклановаВосточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА
НАПЫЛЕНИЯ НА ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В статье рассматриваются подходы к описанию текстур для визуального контроля качества биосовместимого напыления.

Мақалада био-үйлесімді шөгінділердің сапасын визуалды бақылауға арналған текстураның сипаттамалары қарастырылады.

This article describes different texture approaches for visual control of quality of biocompatible coatings.

Ключевые слова: текстура, биосовместимые напыления, фильтр Габора.

В настоящее время в таких сферах медицины, как хирургия, ортопедия, эндопротезирование наблюдается значительный прогресс областей медицины, связанных с использованием имплантатов. Одним из условий успешного функционирования таких изделий медицинского назначения является обеспечение их биосовместимости, для чего используются, во-первых, правильный выбор материалов самих имплантатов, во-вторых, разнообразные технологии повышения биосовместимости имплантатов путем специальных обработок их поверхности, включая нанесение биосовместимых покрытий [1]. При нанесении биосовместимых покрытий на имплантаты различных типов используются высокотехнологические аппараты, но и они не могут гарантировать идеального напыления. Для того чтобы гарантировать, что имплантат не будет отторгаться организмом человека, мы рассмотрим различные методы описания текстур для последующего анализа изображения.

Автоматизации обработки, анализа, распознавания и понимания текстурных признаков посвящены исследования Р.М. Харалика [2], К.И. Лавса [3], Х. Тамуры [4]. Можно выделить работы Д. Четверикова [5] (исследован ряд алгоритмов выделения и классификации текстур), Н.Г. Федотова [6] (применение стохастической геометрии и функционального анализа для распознавания полутонных текстур), К.Н. Спиридонова [7] (применение спектра обобщенных фрактальных признаков для сравнения текстур), А.А. Потапова [8] (технология радиолокационного обнаружения малококонтрастных целей на основе вероятностных текстурных признаков) и М. Стешелецкого [9] (применение текстурного анализа к обработке биомедицинских изображений) [10]. В данной работе мы рассмотрим наиболее распространённые подходы к описанию текстур и на основе полученных теоретических данных выберем метод, который позволит оценить качество текстуры при любом масштабе изображения.

Основные подходы к описанию текстур для визуального контроля качества биосовместимого напыления на изделия медицинского назначения из титана включают в себя следующие подходы.

Статистический подход: метод статистического подхода к описанию текстур позволяет эффективно описывать текстуру изображения из-за определения двумерной смежности яркости пикселей. К достоинствам этого подхода можно отнести то, что текстурные признаки вычисляются по фрагменту изображения. К недостаткам - сложность вычисления. [3, 11].

Геометрический подход: повторяющийся характер расположения текстурных элементов изображения удобно оценивать с помощью функции автокорреляции, которая может использоваться для оценки степени регулярности и мелкозернистости грубой структуры

текстуры. Для крупнозернистой текстуры величина автокорреляционной функции уменьшается незначительно по сравнению с областью, в которой находится мелкозернистая текстура. К достоинствам этого подхода можно отнести то, что использование методов стохастической геометрии уменьшает ошибку автокорреляционной функции и что Blur-инварианты, относящиеся к теории инвариантных моментов, нечувствительны к нарушениям фокуса камеры, вибрациям сенсоров. Недостатком является то, что данный алгоритм очень ограничен в практическом использовании [12].

Спектральный подход: для работы с текстурой изображения в различных масштабах используется Фурье и вейвлет-анализ. Преобразование Фурье следует рассматривать как разложение сигнала на частотную и амплитудную составляющие, то есть обратимый переход от временного в частотное пространство. В случае вейвлет-анализа осуществляется разложение сигнала по базисным функциям (вейвлетам), которые строятся на основе порождающего вейвлета с использованием операций сдвига и масштабирования. К достоинствам данного подхода можно отнести: фильтры независимого анализа компонент отражают основные направления текстуры изображения и при анализе медицинских снимков заметны текстурные отклонения, говорящие об отклонении от нормы. Недостатком является трудность с изменением периода и фазы текстуры [13].

В результате проделанных исследований нами установлен структурно-фазовый состав и ряд свойств образцов из прутков титановых сплавов Grade 5 марки ELi и Ti6-Al-4V. С помощью методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа установлено, что образцы сплава Grade 5 марки ELi имеют двухфазную $\alpha+\beta$ микроструктуру, состоящую из Ti- α -фазы с гексагональной кристаллической решеткой и малой доли Ti- β -фазы с кубической кристаллической решеткой. Металлография образцов сплава с идеальной и нарушенной текстурой представлена на рис. 1.

Образование и рост выделений α -фазы из β , которые, как известно, идут в данных сплавах при охлаждении от температур горячей термомеханической обработки, представлены в виде планок или пластин. Ламеллярная микроструктура состоит из параллельных ламелей α -фазы, разделенных фазой β . Ширина пластин изменяется от двух-трех десятков до нескольких мкм. Размеры зерен - 100-500 мкм. Пакеты или колонии α -пластин имеют размеры от 10 до 500 мкм (рис. 1 а, б) и расположены в основном под непрямыми углами к границам зерен. Границы пакетов имеют ровную морфологию вдоль межзеренных границ (рис. 1, б), однако на рис. 1, в, г наблюдается нарушение текстуры.

Остановимся подробнее на спектральном подходе, фильтре Габора и алгоритме фильтра Габора.

Для работы с текстурой изображения в различных масштабах используется Фурье и Вейвлет-анализ. Преобразование Фурье следует рассматривать как разложение сигнала на частотную и амплитудную составляющие, то есть обратимый переход от временного в частотное пространство. Применительно к изображениям преобразование Фурье используется в том числе для выявления периодических структур, которое можно использовать для детектирования объектов. В качестве входных данных выступает двумерное изображение с наложенным шумом. Пусть имеется входное изображение I размером $N \times M$, где N и M - его высота и ширина, тогда представление двумерного сигнала в частотной области происходит по формуле 1 [14]:

$$I_{i_1, i_2} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{M-1} I_{k_1, k_2} * \exp(j \frac{2\pi}{N} i_1 k_1 + j \frac{2\pi}{M} i_2 k_2), j = \pm 1 \quad (1)$$

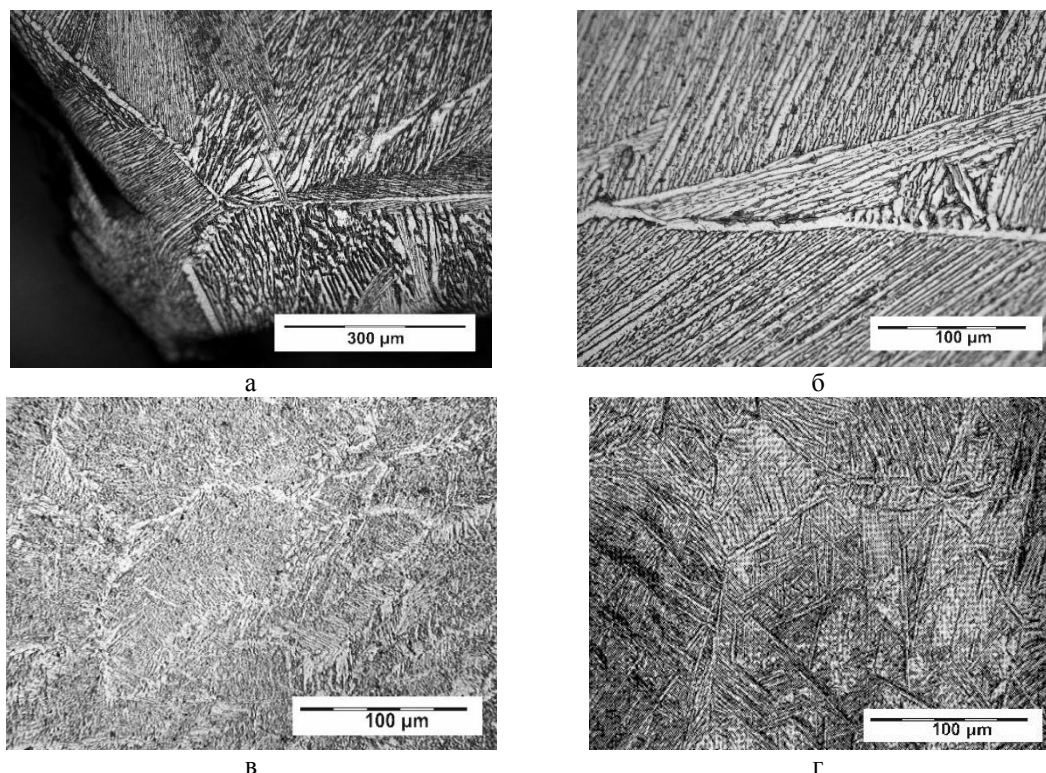


Рисунок 1 - Микроструктура исследуемых образцов сплава Grade 5 марки Eli: а, б - пластины с идеальной текстурой; в, г - пластины с нарушенной текстурой

В случае Вейвлет-анализа осуществляется разложение сигнала по базисным функциям (вейвлетам), которые строятся на основе порождающего вейвлета с использованием операций сдвига и масштабирования. Для исходного изображения строится свертка с базисной функцией (фильтром), далее вычисляется разность полученного и исходного сигнала и строится вторая проекция этой разности, причем каждая базисная функция - сдвиг предыдущей, растянутой в определенное число раз.

Эффективными признаны фильтры независимого анализа компонент (Independent Component Analysis) и фильтры Габора [15]. Первые получаются за счет анализа обучающей выборки изображений, эти фильтры локальны и подобны фильтрам Габора, однако они отражают основные направления текстуры изображений и имеют естественный характер.

Алгоритм, основанный на фильтрах Габора, очень полезен при выявлении направления текстуры. Это является главным достоинством алгоритма. При цифровой обработке изображений этот фильтр применяется для распознавания границ объектов. RGB и HSL цветовые модели являются пригодными для использования данного алгоритма. Необходимо отметить, что этот алгоритм не так популярен, как, например алгоритмы теории графов. Поэтому алгоритм, основанный на фильтрах Габора, вызывает наибольший интерес для разработки и дальнейшей его реализации. Алгоритм, использующий фильтры Габора, основан на работе с двумя матрицами: матрицей изображения и матрицей-фильтром. Исходное изображение может быть представлено в виде матрицы I , матрицы изображения, заполненной значениями — пикселями. Эти значения помещаются в каждую ячейку матрицы. Матрица-фильтр и матрица изображений накладываются друг на друга [16].

Фундаментальной формулой, используемой в ходе реализации алгоритма, является:

$$g(x, y, \delta, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) = e^{\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right)} * \cos\left(2\pi \frac{x'}{\delta} + \varphi\right), \quad (2)$$

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (3)$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta, \quad (4)$$

где δ – длина волны множителя косинуса; θ – определяет ориентацию нормали параллельных полос функции Габора в градусах; φ – определяет сдвиг фаз в градусах; γ – коэффициент сжатия.

Алгоритм программного продукта, реализующий алгоритм Габора, представлен на рис. 2.

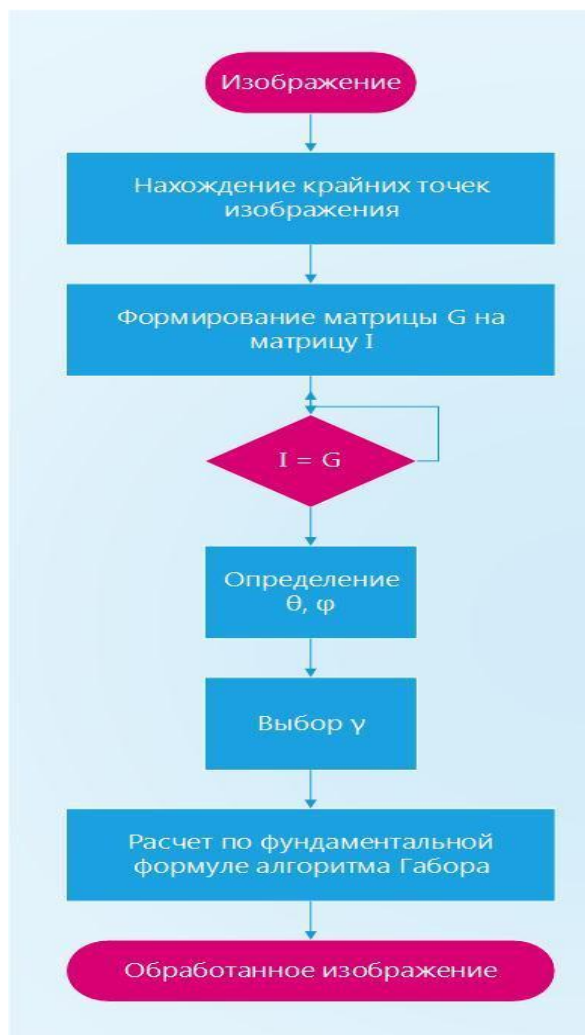


Рисунок 2 - Алгоритм программного продукта, реализующий алгоритм Габора

Исходные изображения образцов сплава Grade 5 марки Elі представлены на рис. 3. Результат работы программного обеспечения представлен на рис. 4.

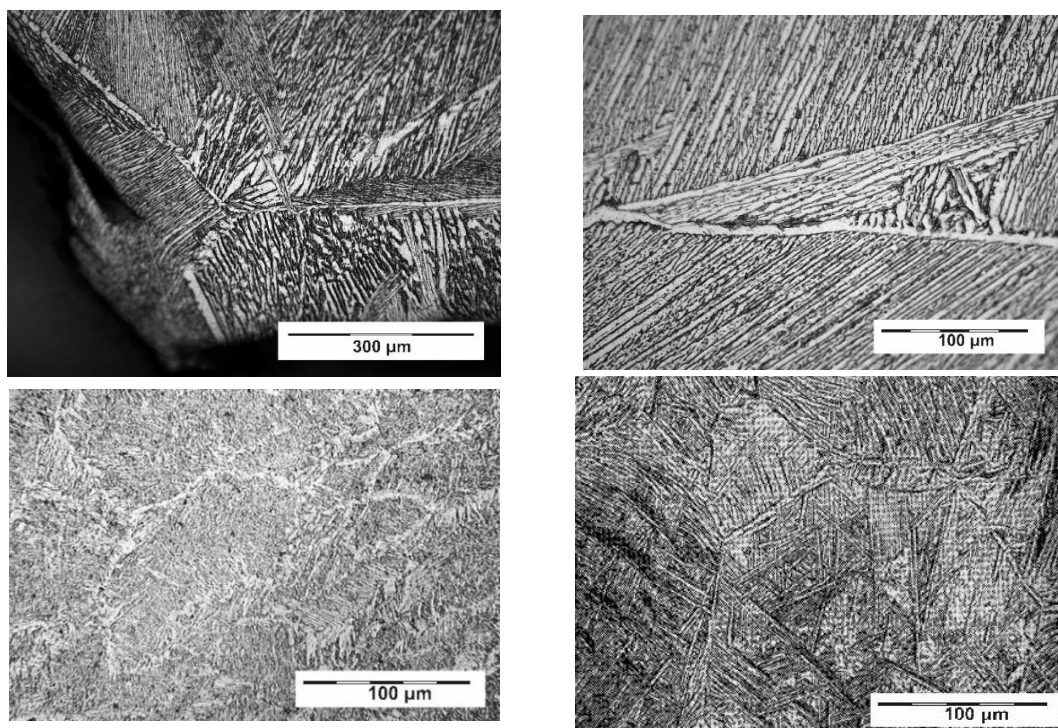


Рисунок 3 – Исходные изображения образцов сплава Grade 5 марки Eli

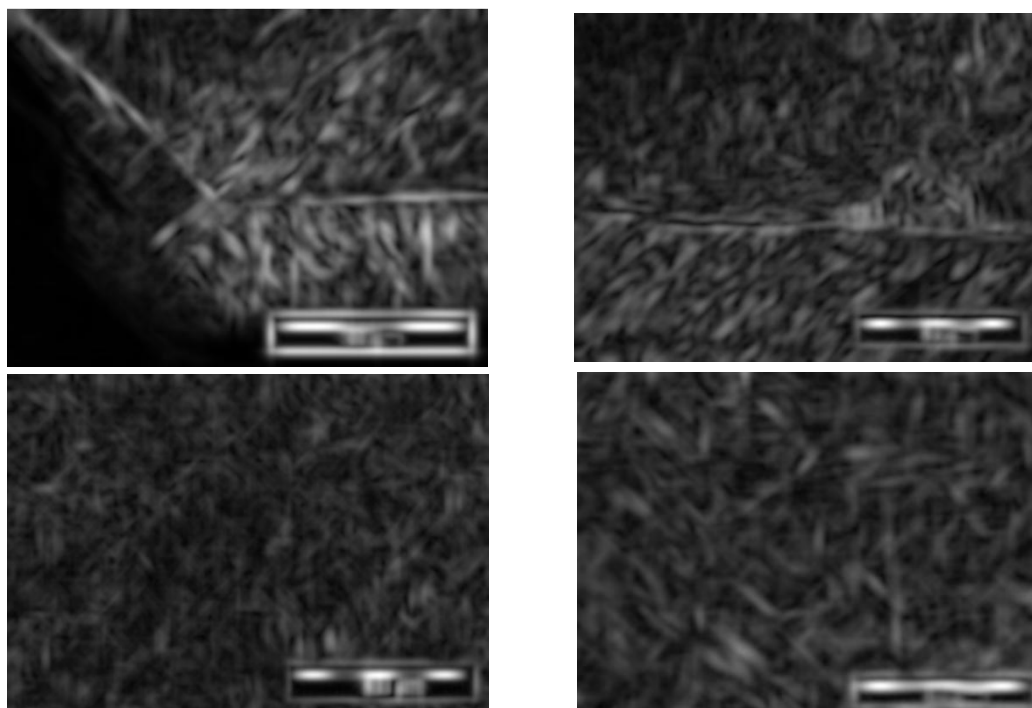


Рисунок 4 – Результат работы программного обеспечения

Обработанное изображение было получено при следующих данных: $\sigma=8$; $\theta = 0$; $\varphi = 1$; $\gamma = 0,5$; $N = 8$.

В заключение можно сделать следующие выводы.

В данной работе были рассмотрены такие подходы к описанию текстур, как статистический, геометрический и спектральный. Были рассмотрены достоинства и недостатки каждого и на основании этого выбран подход, который позволяет оценить качество текстуры при любом масштабе, т.е. спектральный. На основе выполненного исследования с помощью Matlab R2015b было разработано программное обеспечение. Оно позволяет выполнять контроль качества биосовместимого напыления.

Исследование проведено при финансовой поддержке Комитета науки МОиН РК в рамках программно-целевого финансирования по научно-технической программе «Целевая научно-техническая программа Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева, ориентированная на разработку новых видов продукции для производства на ведущих промышленных предприятиях Восточно-Казахстанской области» на 2017-2019 годы, по подпрограмме 0006/ПЦФ «Выпуск титановой продукции для дальнейшего использования в медицине».

Список литературы

1. Hohmann M., Pleier S. Production methods and applications for high-quality metal powders and spray formed products // *Acta metallurgica sinica*, Vol. 18, №1, 2005, pp. 15-23.
2. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture // *Proceedings of the IEEE*, 1979. Vol.67, no.5, p.768–804.
3. Laws K.I. Rapid texture identification // *SPIE*, 1980. Vol.238, p.376–380.
4. Tamura H., Mori S., Yamawaki T. Textural features corresponding to visual perception // *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1978. Vol.8, p.400–473.
5. Chetverikov D. Texture feature based interaction maps and structural filtering // *20th Workshop of the Austrian Pattern Recognition Group*, 1996, p.143–157.
6. Федотов Н.Г. Методы стохастической геометрии в распознавании образов. - М.: Радио и связь, 1990 г. - 144 с.
7. Спиридонов К.Н. Применение спектра обобщенных фрактальных размерностей Реньи для сравнения текстур изображений. - Петрозаводск, 2008.
8. Потапов А.А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоcontrastных целей // *Радиотехника и электроника*, 2003. - Т. 48. - № 9. - С. 1101–1119.
9. Strzelecki M. Segmentation of textured biomedical images using neural networks, PhD Thesis, Technical University of Lodz, Poland, (1995).
10. Фраленко В.П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли. – 2014. - № 5:4. - С. 16-39.
11. Tamura H., Mori S., Yamawaki T. Textural features corresponding to visual perception // *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1978. Vol.8, p.400–473.
12. Антошук С.Г. Система распознавания текстурных изображений при экологическом мониторинге / С.Г. Антошук, Н.А. Сербина // *Искусственный интеллект*, 2002. - Т. 4. - С. 406–413.
13. Шитова О.В. Анализ методов сегментации текстурных областей изображений в системах обработки изображений / О.В. Шитова, А.Н. Пухляк, Е.М. Дроб. – 2014. - № 8 (179). - С. 182-188.
14. Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2009. - 248 с.
15. Bell A.J., Senjnowsky T.J., The “independent components” of natural scenes are edge filters // *Vision Research*, 1997. Vol.37, no.23, p.3327–3338.
16. Козлова И.В. Текстура сегментация изображений. Алгоритм, основанный на фильтрах Габора. – 2012. - № 10. - С. 442-444.

Получено 13.08.2018

УДК 669-1

А.А. Каравайцева, Л.И. Квеглис

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

С.С. Герт, В.В. Анфилофьев

Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова,

г. Усть-Каменогорск

ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В МАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ 20ГЛ

В данной работе рассматриваются обнаруженные аномалии в поведении акустических волн в стали 20ГЛ. Выявлено образование частиц марганца после обработки импульсным током стали 20ГЛ.

Осы жұмыста 20ГЛ болатта акустикалық толқындардың жүру бағытындағы ауытқулар анықталған. 20 ГЛ болатты импульстік токпен өңдегеннен кейін марганец бөлшектерінің пайда болуы анықталған.

In this work, we discovered anomalies in the behavior of acoustic waves in steel 20GL. Correlation between speed of ultrasound and the size of granule set at different temperatures.

Ключевые слова: поглощение ультразвука, пластическая деформация, сталь 20ГЛ, микроструктура, температурная зависимость.

Ультразвуковая обработка металлов - один из новых эффективных способов, применяющихся в металлургии для улучшения качества металлов. Облучение ультразвуком расплавленного металла приводит к заметному измельчению зерна и уменьшению пористости. Кроме того, ультразвук повышает механические свойства затвердевших расплавов и намного улучшает способность металла к пластической деформации. Одной из новых областей применения ультразвука является процесс кристаллизации, определяющий качество готовых деталей, особенно таких, которые получают методом литья. Если расплавленный кристаллизующийся металл обработать ультразвуком, произойдет измельчение зерен, уменьшится пористость, а структура отливки будет более равномерной.

Твердые тела однородны для ультразвуковых волн только до тех пор, пока неоднородности, имеющиеся в них (а эти неоднородности всегда есть), значительно меньше длины волны [1]. Однородность структуры металлов и сплавов достигается измельчением, вплоть до возникновения наноструктурных состояний, что может быть обеспечено интенсивной пластической деформацией (ИПД) [2]. ИПД лучше всего проводить в таких условиях, когда достигнут максимальный коэффициент поглощения ультразвуковых волн в веществе. Исследование поглощения ультразвука в металлах в процессе их пластической деформации представляет практический интерес при обработке металлов давлением с целью снижения усилия деформации [3].

Сталь 20ГЛ используется для изготовления ответственных изделий сложного сечения, используемых в железнодорожном транспорте, поэтому необходимо выявить оптимальные условия ее механической обработки: условия, при которых коэффициент поглощения ультразвуковых волн позволит проводить интенсивную пластическую деформацию с минимальной нагрузкой [4]. Такие изделия работают в условиях пониженных температур и знакопеременных нагрузок. При неправильной заливке стали в сечениях образуются неоднородности кристаллического строения, трещины и раковины, которые выявляются методами неразрушающего контроля. Эти дефекты можно устранить посредством ИПД.

Целью работы является исследование возможности поглощения ультразвука в стали 20ГЛ, выявление причин данного эффекта и теоретическое обоснование наблюдаемых явлений.

В качестве образцов для исследования использовали исходную литую сталь 20ГЛ. С целью получения серии образцов с нарастающим размером структурных элементов их подвергли термической обработке при температуре 900 °С, задавая разное время выдержки в муфельной печи, с дальнейшим охлаждением на воздухе. Микроструктуру стали исследовали на оптическом металлографическом микроскопе СХ-4 при увеличении $\times 100$ и $\times 500$ крат. Скорость ультразвука измеряли методом автоциркуляции импульсов на ультразвуковом толщиномере А1209. Микроструктуру и размер зерна определяли по ГОСТу 5639-82.

Для измерения скорости распространения поверхностной волны в стали поверхность образца делили на прямоугольные участки, соответствующие размеру датчика (расстояние между пьезопреобразователями 33 мм). В каждом участке скорость определяли 5-7 раз, затем находили среднее значение.

В выражении для плоских ультразвуковых волн, как и в основном уравнении движения упругой среды, не учитывается ослабление волны, связанное с затуханием ультразвука [5]. В реальных средах по причине внутреннего трения, неидеальных упругих свойств и других эффектов затухание ультразвука имеет существенное значение.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов рассеяния δ_r и поглощения δ_p , т.е. $\delta = \delta_p + \delta_r$ [6]. При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии остается звуковой, но уходит из направленно-распространяющейся волны в результате отражений на границах зерен и неоднородностей.

Поглощение звука в твердых телах обуславливается в основном внутренним трением и теплопроводностью [7]. Поглощение поперечных волн меньше, чем продольных, так как они не связаны с адиабатическими изменениями объема, при которых появляются потери на теплопроводность. Коэффициент поглощения в твердых телах пропорционален f (стекло, биологические ткани, металлы) или f^2 (резина, пластмассы) [8].

В монокристаллах затухание определяется поглощением ультразвука. Металлы, применяемые на практике, имеют поликристаллическое строение, и в них обычно затухание ультразвука определяется прежде всего рассеянием. В кристаллах скорость звука имеет разное значение в зависимости от направления его распространения относительно осей симметрии кристалла. Это явление называют упругой анизотропией.

В куске металла кристаллы ориентированы различным образом, поэтому при переходе ультразвука из одного кристалла в другой скорость звука может меняться в большей или меньшей степени. В результате возникают частичное отражение, преломление и трансформация ультразвука, что обуславливает механизм рассеяния.

Большое влияние на коэффициент рассеяния в металлах оказывает отношение D (средней величины зерна) и длины волны ультразвука λ . При $\lambda \ll D$ звук поглощается каждым зерном как одним большим кристаллом, затухание ультразвука определяется в основном поглощением. При $\lambda \approx D$ рассеяние ультразвука очень велико. Он как бы проникает, диффундирует между отдельными кристаллами. Это область диффузного рассеяния [9].

Уникальной особенностью ультразвуковых методов является то, что при температурах, близких к температуре фазового перехода второго рода, в магнитных системах и системах, демонстрирующих структурные фазовые переходы, происходит аномально сильное поглощение ультразвука [10], наглядно выявляемое экспериментально на рис. 1.

График зависимости скорости ультразвука от балла зерна при температуре -60 °С имеет более резкий спад и подъем, что связано с тем, что при уменьшении температуры скорость распространения ультразвука увеличивается [11]. Проанализировав полученную зависимость, можно сделать вывод, что при размере зерна 6-7 баллов (рис. 2) и частоте 4 МГц скорость ультразвука заметно снижается. Можно сделать предположение, что в

данном месте происходит эффект поглощения ультразвука. Это связано с процессом кристаллизации, т.к. при 6-7 баллах зерна в микроструктуре стали 20ГЛ наблюдаются крупные ферритные зерна, скопления ферритных зерен и ферритная сетка. То есть наблюдается структурная неоднородность с одновременным уменьшением ультразвуковой проницаемости.

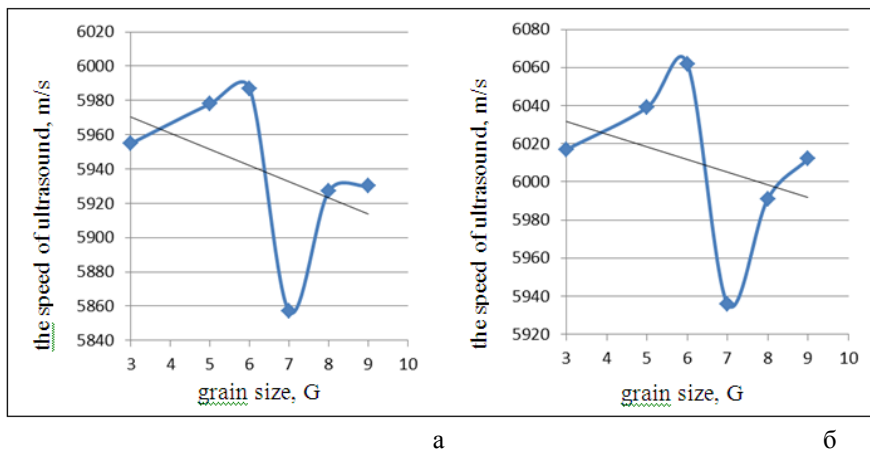


Рисунок 1 - Обнаруженная зависимость скорости ультразвука от балла зерна: а - при 20 °С; б - при -60 °С

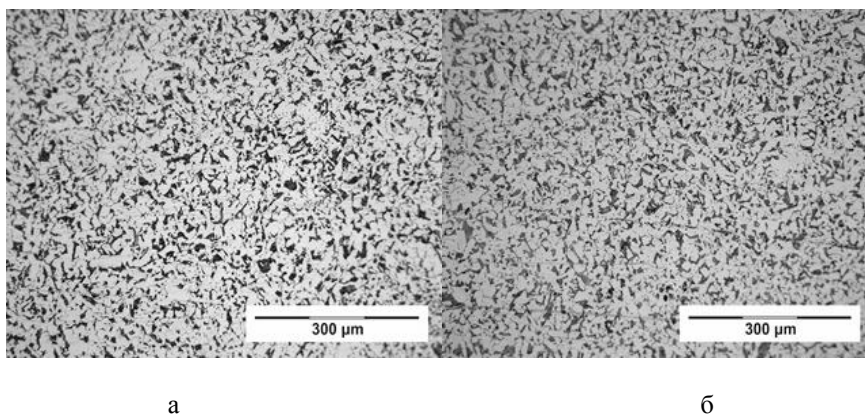


Рисунок 2 - Фотографии микроструктур образцов из стали 20ГЛ : а - образец № 2, б - образец № 3

С целью релаксации внутренних напряжений, в результате которой может уменьшаться поглощение ультразвука, наблюдаемое в образце № 3 (рис. 2) стали 20ГЛ, провели обработку образцов воздействием импульсного тока плотностью 100 А/мм². В работе [12] импульсный ток при определенных режимах может быть использован для ускоренной релаксации внутренних напряжений.

Исследования с помощью рентгеновской дифракции проводили на образце № 3 после испытаний ультразвуком до обработки током и после (рис. 3). Межплоскостные расстояния α -Fe и β -Mn показаны в табл. 1.

Сопоставляя рефлексы на рентгенограмме (рис. 3) с данными табл. 2, можно заключить, что рефлекс (221) β -марганца можно сравнить с рефлексом (110) α -железа по их интенсивности. Оба рефлекса имеют интенсивность 100%, если рассматривать однокомпо-

нентные материалы. Атомные факторы рассеяния этих материалов практически одинаковы, поскольку они расположены рядом в периодической таблице химических элементов.

Затем снова провели испытания ультразвуком, в результате которого выявлено еще более сильное поглощение ультразвука (3 новых точки на рис. 4).

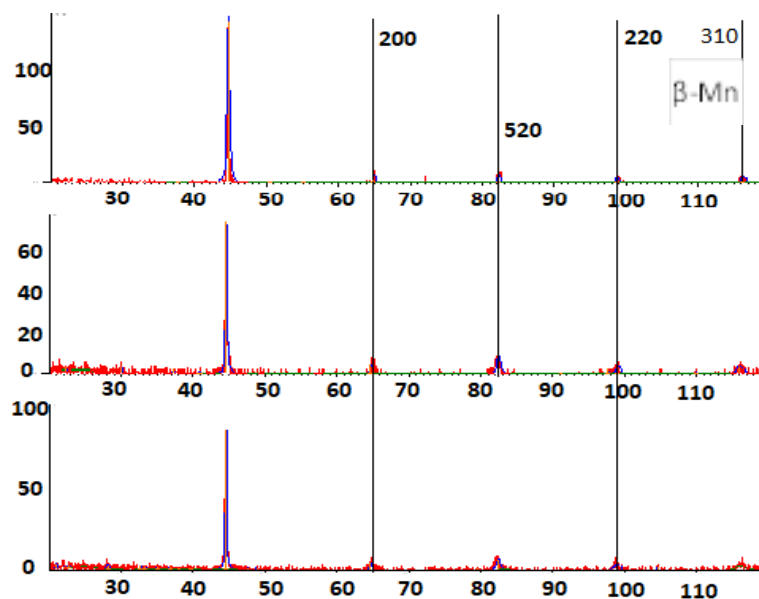


Рисунок 3 - Рентгенограммы образца № 3. Сверху-вниз: до обработки током, после обработки током, под углом 90° по отношению к направлению тока

Таблица 1

Межплоскостные расстояния α -Fe и β -Mn

α -Fe			β -Mn		
h k l	d	Int.	h k l	d	Int.
110	2,01	1,00	210	2,81	0,07
200	1,428	0,15	221	2,10	1,00
211	1,166	0,38	310	2,00	0,66
220	1,010	0,10	311	1,90	0,27
310	0,904	0,08	321	1,68	0,07
222	0,825	0,03	411	1,485	0,03
321	0,764	0,10	420	1,410	0,03
330	0,673	0,03	510	1,237	0,30
420	0,638	0,03	520	1,170	0,20
			531	1,064	0,03
			442	1,051	0,03

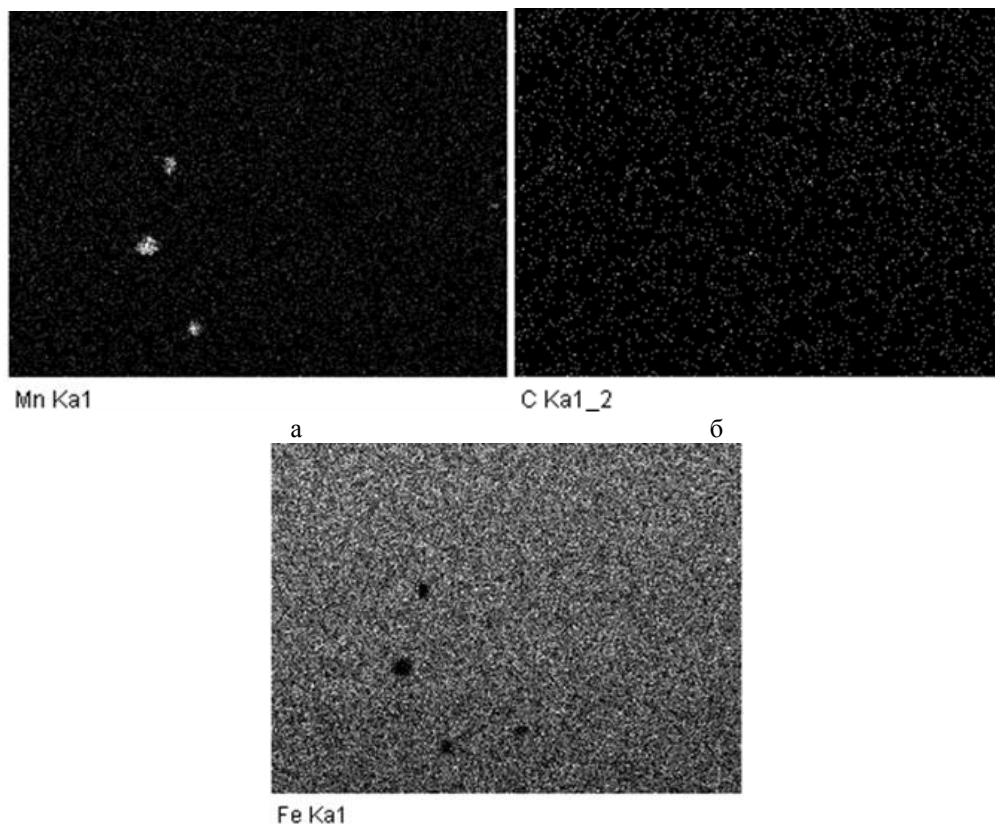
Считая интенсивность рефлекса (110) α -железа равной 100%, можно сказать, что интенсивность рефлекса (221) β -марганца составит 4,8%. Такая оценка позволяет считать, что в сплаве стали 20ГЛ Mn содержится более чем в 2 раза больше, чем в исходном составе (табл. 3).

Таблица 2

Химический состав стали 20ГЛ

Массовая доля элементов								
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
			Не более					
0,17-0,25	0,30-0,50	1,10-1,40	0,030 ¹⁾	0,040 ¹⁾	0,30	0,30	0,60	0,02-0,06
			0,030 ²⁾	0,030 ²⁾				
			0,020 ³⁾	0,020 ³⁾				

На рис. 4 приведены изображения, полученные в сканирующем электронном микроскопе с микроанализатором INCA Energy (рис. 4, *а* – в лучах марганца Ka; 4, *б* - в лучах углерода; 4, *в* - в лучах железа). Сравнивая состояние образца № 3 до и после обработки импульсным током (рис. 4), можно считать, что такая обработка приводит к образованию дополнительных частиц Mn. Если бы частицы Mn были сформированы при выплавке, то они бы ассоциировались с C, образуя фазу Mn₃C. Выпавшие частицы Mn существуют самостоятельно и не ассоциируются с C (рис. 4).



в

Рисунок 4 – РЭМ-изображения образца № 3 стали 20ГЛ после облучения электрическим импульсом и элементное картирование по: а – Mn; б – C; в - Fe

Микронзондовый анализ (рис. 4) показал, что около 2% площади занимают частицы марганца. Положение этих частиц не ассоциируется с положением частиц углерода – на

изображении в лучах углерода эти места темные. Следовательно, происхождение частиц марганца не связано с выплавкой стали, поскольку при выплавке он легко образует карбиды марганца, следовательно появление частиц марганца после прохождения тока высокой плотности может быть связано с реакцией трансмутации железа 57 в марганец 55. Известно, что в любом образце железа существует 2% изотопа железа 57. Такая реакция возможна [13].

Оценка возможности прохождения реакции трансмутации ${}_{26}\text{Fe}^{57} \rightarrow {}_{25}\text{Mn}^{55}$ показана в табл. 3. В левом столбце перечислены возможные возбудители реакции трансмутации. Во втором столбце частоты и энергии: волн пластической деформации, тока высокой частоты и резонансные частоты при взаимодействии упругих волн с системой ядерных спинов.

Таблица 3

Возможные возбудители реакции ${}_{26}\text{Fe}^{57} \rightarrow {}_{25}\text{Mn}^{55}$

Возбудитель взаимопревращения ${}_{26}\text{Fe}^{57} \rightarrow {}_{25}\text{Mn}^{55}$	Частота (Гц)	Энергия
Волна пластической деформации при ультразвуке	60 ГГц	Энергия, попадающая от ударной волны на 1 атом $\approx 6,5821 \cdot 10^{-5}$ эВ \rightarrow на 1 частицу ($280 \cdot 10^9$ атомов) $\approx 18,4$ МэВ при v ударной волны $\approx 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
Электрический ток высокой частоты	20 МГц	Энергия, попадающая от тока высокой частоты на образование 1 частицы марганца ($280 \cdot 10^9$ атомов), при 1 импульсе ≈ 2 МэВ, при 10 импульсах накопления ≈ 20 МэВ, если ток проходит по каналам на площади 4,8% от площади образца.
Е отрыва протона (p+) от ядра ${}^{\text{Fe}56}$		На отрыв протона в ядре Fe^{56} потребуется 9,6 МэВ энергии. На отрыв протона в ядре Fe^{57} потребуется 17,9 МэВ энергии.

Все перечисленные явления могут иметь место в образцах марганцовистых сталей.

Из табл. 3 видно, что энергии ударной волны при ультразвуке с частотой $\nu = 60$ ГГц для реакции трансмутации железа в марганец недостаточно. Однако частицы марганца таких объемов были обнаружены нами ранее после испытания на маятниковом копре. Известно, что при проектировании современных реакторных установок и выборе конструкционных материалов для них необходимо учитывать возможность накопления и неконтролируемого высвобождения избыточной энергии в материалах [14]. В случае накопления ядром избыточной энергии возможны спонтанные реакции трансмутации. Подобные явления наблюдаются в эксперименте при прохождении тока высокой частоты через образец марганцовистой стали 20ГЛ. В результате наблюдается усиление поглощения ультразвука.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Обнаружены аномалии в поведении акустических волн в сплаве стали 20ГЛ.
2. Выявлено образование дополнительных частиц марганца после обработки импульсным током стали 20ГЛ.
3. Полученные результаты могут быть использованы для создания технологии обработки изделий сложной формы из стали 20ГЛ.

Список литературы

1. Красильников В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. - М.: 1960.
2. Панкратов Д.Л. Исследование разрушения образцов, полученных интенсивной пластической деформацией выдавливанием / Д.Л. Панкратов, В.Г. Шibaков, А.П. Андреев и др.
3. Кулемин А.В. Поглощение ультразвука в металлах в процессе их пластической деформации / Акустический журнал. - 1980. - Т. 26. - Вып. 5. - С. 735-740.
4. Прудников П.В. Аномальное поглощение ультразвука в твердых телах при фазовых переходах второго рода с учетом эффектов релаксации. Акустические методы исследования структуры и свойств через частотные и температурные зависимости коэффициента поглощения ультразвука / П.В. Прудников, В.В. Прудников, Е.А. Носихин. - Физика металлов и металловедение. - 2007. - Т. 104. - № 3. - С. 235-240.
5. Трефилов В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. - Киев: Наукова думка, 1975. - 315 с.
6. Рубцов А.С. Структурные особенности пластической деформации на стадии локализации течения / А.С. Рубцов, В.В. Рыбин // Физика металлов и металловедение. - 1977. - Т. 44. - Вып. 3. - С. 611-621.
7. Манилов В.А. Структурные изменения в хrome при деформации / В.А. Манилов, В.Г. Ткаченко, В.И. Трефилов и др. // Металлы. - 1967. - № 2. - С. 114-122.
8. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 226 с.
9. Ландау Л.Д., Халатников И.М. - ДАН СССР, 1954. - Т. 96. - С. 496.
10. Романова А.А. Исследование влияния модифицирования и микролегирования стали 20ГЛ на ее механические свойства и микроструктуру: Сб. 19 конф. «Решетневские чтения» / А.А. Романова, А.В. Павлов, И.В. Немцев и др. - 2015.
11. Алабышев А.П. Расчет скорости распространения ультразвука в зависимости от температуры материала: 20-я Междунар. науч.-техн. конф. "Новые материалы и технологии в машиностроении - 2014".
12. Столяров В.В. Электростимулирование пластической деформации объемных наноструктурных титановых сплавов с эффектом памяти формы. - М.: ИМАШ РАН.
13. Квеглис Л. И. Особенности структуры межзеренных границ в сплавах инварного состава на основе Fe-Mn и Fe-Ni / Л.И. Квеглис, В.С. Жигалов, В.В. Казанцева и др. // Нанотехника. - 2007. - № 4. - С. 73-78.
14. Шаманин И.В. Краткие сообщения по физике: Сб. статей / И.В. Шаманин, М.А. Казарян, С.Н. Тимченко и др. - 2017. - Т. 44. - № 9. - С. 10-16.

Получено 13.08.2018

УДК 621.095

С.Д. Капаева

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

С.А. Николаенко

Уральский федеральный университет им. первого президента Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

**УПРОЧНЕНИЕ РОЛИКОВ СТАНКА ДЛЯ НАВИВКИ ПРУЖИН МЕТОДОМ
МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

В работе представлено исследование одного из современных методов повышения износостойкости поверхностей деталей машин - микроплазменное упрочнение. Представлены результаты микроплазменного напыления с различными режимами и способами – без оплавления нанесенного слоя порошка и с оплавлением.

Жұмыста машиналардың беткі бөлшектерінің тозуға төзімділігін арттырудың заманауи әдістерінің бірі - микроплазмалық қатайту әдісі көрсетілген. Жұмыста микроплазмалық балқытудың әртүрлі режимде және әдісте – жағылатын ұнтақты балқыту және балқытпау нәтижелері қарастырылған.

The scientific work shows microplasma spraying as a modern method for hardening the surfaces of parts. The scientific work presents the results of microplasma spraying with different methods without melting the applied layer of powder and with melting.

Ответственными деталями станков, автоматов и полуавтоматов для навивки пружин являются подающие проволоку ролики. Под действием постоянного трения при прохождении пружинной проволоки рабочая поверхность роликов претерпевает равномерный либо неравномерный износ. В результате износа возникает дисбаланс вращающихся роликов и прерывистая подача проволоки.

Одним из методов повышения износостойкости поверхностей деталей машин является микроплазменное упрочнение. В данной работе рассмотрено микроплазменное напыление, проведенное с различными режимами и способами: без оплавления нанесенного слоя порошка и с оплавлением. Техника микроплазменного напыления покрытий обеспечивает малый размер пятна напыления (несколько десятков миллиметров), отличается небольшими габаритами оборудования и низким уровнем шумовыделения. Уникальность метода плазменного напыления заключается в высокой температуре (до 50 тыс. градусов по Цельсию) плазменной струи и высокой скорости (до 500 м/с) движения частиц в струе. Нагрев же напыляемой поверхности невелик и составляет не более 200 градусов. Производительность плазменного напыления составляет 3-20 кг/ч для плазмотронных установок мощностью 30...40 кВт и 50-80 кг/ч для оборудования мощностью 150...200 кВт.

Прочность сцепления покрытия с поверхностью детали в среднем равна 10-55 МПа на отрыв, а в некоторых случаях до 120 МПа. Пористость покрытия находится в пределах 10...15%. Толщина покрытия обычно не более 1 мм, так как при ее увеличении в напыляемом слое возникают напряжения, стремящиеся отделить его от поверхности детали. Плазмообразующими газами служат азот, гелий, аргон, водород, их смеси и смесь воздуха с метаном, пропаном или бутаном.

Основой для плазменного напыления могут служить металлы и неметаллы (пластмасса, кирпич, бетон, графит и др.). Для нанесения покрытий на небольшие поверхности применяется микроплазменный способ напыления, который позволяет сэкономить потери напыляемого материала (ширина напыления 1-3 мм). Для плазменного напыления используют проволоку, в том числе порошкового типа, порошки из черных и цветных металлов, никеля, молибдена, хрома, меди, оксиды металлов, карбиды металлов и их композиции с никелем и кобальтом, сплавы металлов, композиционные материалы (никель-графит, никель-алюминий и др.) и механические смеси металлов, сплавов и карбидов (рис. 1). Регулирование режима напыления позволяет наносить как тугоплавкие материалы, так и легкоплавкие. Процесс микроплазменного напыления заключается в расплавлении материала покрытия с последующим нанесением (напылением) его на основу в газовом потоке. В микроне зоне удара частиц расплава о покрываемую поверхность они деформируются и растекаются, последовательно слипаясь друг с другом и затвердевая, и формируют плоский слой. В качестве напыляемого материала применяют порошки, прутки и проволоку. Рассмотрим основные материалы для напыления, исходя из физических свойств, которые они придают обрабатываемой поверхности.

В данном исследовании использована установка МПН-004, отличающаяся малым размером пятна напыления, составляющим 1-5 мм, и прочностью сцепления покрытий с основой, достигающей 40 МПа (рис. 2-4).



Рисунок 1 – Порошки для напыления



Рисунок 2– Установка МПН-004 для микроплазменного напыления порошковым материалом ролика, установленного в приспособлении



Рисунок 3 – Источник питания и газа для микроплазменного напыления



Рисунок 4 – Процесс микроплазменного напыления образцов

Установка МПН-004 включает источник питания с панелью управления, плазматрон и специальное устройство для подачи порошка.

Процесс плазменного напыления включает 3 основных этапа:

- 1) подготовка поверхности;
- 2) напыление и дополнительная обработка покрытия для улучшения свойств;
- 3) механическая обработка для достижения чистовых размеров.

Предварительные размеры поверхностей под напыление должны быть определены с учетом толщины напыления и припуска на последующую механическую обработку. Переходы поверхностей должны быть плавными, без острых углов, во избежание отслаивания покрытия. Отношение ширины паза или диаметра отверстия к его глубине должно быть не меньше 2.

Оценка эффективности применительно к конкретному технологическому процессу микроплазменного напыления требует экспериментальных исследований с целью определения изменения основных параметров процесса упрочнения.

Для проведения исследований принимаем следующие материалы:

- в качестве упрочняемого металла – сталь 5ХНМ и 5ХНМ с однослойным напыленным слоем порошка ПГ-10Н-01;
- в качестве напыляемого материала - порошок ПГ-10Н-01;
- в качестве сравнения – образцы, напыленные порошками X20H80, Al_2O_3 и сталью 65Г, в виде проволоки.

Исследования проводили с параметрами факторов в пределах варьирования режимов: расстояние от сопла до детали (L, мм) при проведении экспериментов изменяется в пре-

делах от 30 до 50 мм (первый фактор), а время напыления (Т, сек) - от 22 до 38 сек (второй фактор).

Кодирование первого фактора (расстояние от сопла до детали) и второго (время напыления).

Для первого фактора (X_1).

Основной уровень (О.У.):

$$X_{10} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2} = \frac{50 + 30}{2} = 40.$$

Интервал варьирования:

$$J_1 = \frac{X_{max} - X_{min}}{2} = \frac{50 - 30}{2} = 10.$$

Кодированное значение для первого фактора:

Верхний уровень (В.У.):

$$X_1 = \frac{X_{max} + X_{10}}{J_1} = \frac{50 - 40}{10} = +1.$$

Нижний уровень:

$$X_{j0} = \frac{X_{min} + X_{10}}{J_1} = \frac{30 + 40}{10} = -1.$$

Таким образом, кодированное значение для первого фактора: $-X_1(+1; -1)$.

Для удобства декодирования значение первого фактора можно записать в виде

$$X_1 = \frac{L - 40}{10}. \quad (1)$$

Для второго фактора (X_2).

Основной уровень:

$$X_{20} = \frac{38 + 22}{2} = 30.$$

Интервал варьирования:

$$J_2 = \frac{38 - 22}{2} = 8.$$

Верхний уровень (В.У.):

$$X_2 = \frac{38 - 30}{8} = +1.$$

Нижний уровень (Н.У.):

$$X_2 = \frac{22 - 30}{8} = -1.$$

Таким образом, $X_2(+1; -1)$.

Для декодирования

$$X_2 = \frac{T - 30}{8}. \quad (2)$$

После кодирования факторов составляется матрица (табл. 1) проведения эксперимента. Для двухфакторного эксперимента она имеет следующий вид.

Таблица 1

Матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 \times X_2$	Y
1	+1	-1	-1	+1	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	Y_3
4	+1	+1	+1	+1	Y_4

Из данных таблицы видно, что для двух факторов необходимо проведение четырех экспериментов, для каждого из которых получают соответствующие значения исследуемого параметра Y (в нашем случае – значение микротвердости, HV).

Согласно матрице планирования экспериментов, получены значения микротвердости поверхности образцов (табл. 2-4).

Таблица 2

Значение микротвердости образцов

Наплавленный материал	Среднее значение микротвердости HV-образцов				
	1 образец	2 образец	3 образец	4 образец	Толщина напыленного слоя
ПГ-10-Н-01 порошок	189	183	193	187	0,4
ПГ-10-Н-01 оплавленный	213	208	205	214	0,7
Среднее значение микротвердости HV образцов для сравнения					
X20H80 порошок	128				
Al2O3 порошок	672				
65Г проволока	217				
Твердость стали 5ХНМ без напыления	132				

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента с заданными факторами варьирования при напылении порошком ПГ-10Н-01

Опыт	X_0	$X_1(L)$	$X_2(T)$	y , HV (эксп.)	y , HV(расчетн.)
1	+ 1	-1 (30)	-1 (22)	189	192
2	+ 1	+1 (50)	-1 (22)	183	168
3	+ 1	-1 (30)	+1 (38)	193	207
4	+ 1	+1(50)	+1 (38)	187	183

Таблица 4

Матрица планирования эксперимента с заданными факторами варьирования при напылении порошком ПГ-10Н-01 с оплавлением

Опыты	X_0	$X_1(L)$	$X_2(T)$	y , HV (эксп)	y , HV (расчетн.)
1	+ 1	-1 (30)	-1 (22)	213	206
2	+ 1	+1 (50)	-1 (22)	208	214
3	+ 1	-1 (30)	+1 (38)	205	203
4	+ 1	+1(50)	+1 (38)	214	211

Затем исследуемый процесс описывается приближенными математическими зависимостями, например полиномом 1 степени, и после определения коэффициентов полинома производится проверка соответствия (адекватности) принятой математической зависимости экспериментальным данным. При отсутствии адекватности процесс описывается полиномами более высоких порядков с последующей проверкой адекватности.

Полинома I степени (линейной модели процесса) для двух факторов:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2. \quad (3)$$

Зачастую используют неполную квадратичную модель:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{1;2}x_1x_2, \quad (4)$$

где произведение x_1x_2 называется эффектом парного взаимодействия.

Коэффициенты зависимостей (3) и (4) формулы определяют с учетом данных таблиц

матриц по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u; \quad a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{ui} \cdot y_u; \quad a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_i \cdot x_j \cdot y_u, \quad (5)$$

где: u - номер опыта; i, j - номер факторов; N - число опытов.

По значению коэффициентов при факторах x_1 и x_2 зависимостей (3) или (4) судят о степени влияния на исследуемый процесс.

Аппроксимируем процесс линейной регрессией и по формулам (5) определяем значение ее коэффициентов с учетом данных табл. 4:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (6)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u = \frac{189 + 183 + 193 + 187}{4} = 188;$$

$$a_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{ui} \cdot y_u = \frac{-1 \cdot 189 + +1 \cdot 183 + -1 \cdot 193 + +1 \cdot 187}{4} = -3;$$

$$a_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_i \cdot x_j \cdot y_u = \frac{-1 \cdot 189 + -1 \cdot 183 + +1 \cdot 193 + +1 \cdot 187}{4} = 2.$$

С учетом полученных значений коэффициентов уравнение (6) примет вид:

$$y = 188 - 3x_1 + 2x_2. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) формулы для декодирования (1), (2), т.е. $X_1 = \frac{L-40}{10}$ и $X_2 = \frac{T-30}{8}$, и заменив $y = HV$, получим после преобразований уравнение процесса в натуральном виде:

$$HV = 188,5 - 0,3L + 0,25T. \quad (8)$$

Аппроксимируем процесс линейной регрессией и по формулам (5) определяем значение ее коэффициентов с учетом данных табл. 4:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u = \frac{213 + 208 + 205 + 214}{4} = 210;$$

$$a_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{ui} \cdot y_u = \frac{-1 \cdot 213 + +1 \cdot 208 + -1 \cdot 205 + +1 \cdot 214}{4} = 1;$$

$$a_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_i \cdot x_j \cdot y_u = \frac{-1 \cdot 213 + -1 \cdot 208 + +1 \cdot 205 + +1 \cdot 214}{4} = -0,5.$$

С учетом полученных значений коэффициентов уравнение (9) примет вид:

$$y = 210 + x_1 - 0,5x_2. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (10) формулы для декодирования (1), (2), т.е. $X_1 = \frac{L-40}{10}$ и $X_2 = \frac{T-30}{8}$, и заменив $y = HV$, получим после преобразований уравнение процесса в натуральном виде:

$$HV = 207,9 + 0,1L - 0,06T. \quad (10)$$

Расчеты по формулам (8) или (10) дают результаты, идентичные экспериментальным данным, что свидетельствует об адекватности уравнения описываемому процессу.

В результате получена математическая модель процесса, позволяющая предварительно проанализировать влияние факторов. Результаты исследования образцов на износ при испытании их на стенде при постоянном контактном трении показаны в табл. 5.

Таблица 5

Результаты исследования на износ

Образец	Вес до испытаний, гр	Вес после испытаний, гр
Эталонный	74,635	74,611
ПГ-10Н-01	19,748	19,632
ПГ-10Н-01 оплавленный	19,771	19,749

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Определены факторы, влияющие на качество процесса напыления и твердости поверхности деталей.
2. Проведены эксперименты с наработкой большого массива результатов, согласно составленным матрицам планирования экспериментов.
3. Определено, что твердость поверхностного слоя, образованного микроплазменным напылением, составила 188HV и 213HV для напыления порошком ПГ-10Н-01 без оплавления и последующим оплавлением соответственно.
4. Методом испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79) установлено, что потери веса образцов составили: 0,116 и 0,022 гр/час для напыления порошком ПГ-10Н-01 без оплавления и последующим оплавлением соответственно.
5. В результате исследования влияния факторов наплавки на твердость напыленного слоя определены математические зависимости и составлены математические модели, описывающие этот процесс.
6. Проведено сравнение исследованных образцов по твердости напыленного слоя с образцами, напыленными другими материалами.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 53.49.13

Св.С. Квон, В.Ю. Куликов, А.М. Достаева, Г.Х. Адамова

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩЕЙ ЧАСТИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА**

В работе рассмотрена возможность использования металлосодержащей части сталеплавильных и литейных шлаков в качестве фригиторов. Показано, что введение металлосодержащей части (восстановленное железо и корольки) шлаков, полученных в процессе выплавки сталей, близких по химическому составу, можно использовать в качестве фригиторов без изменения химического состава выплавляемой стали. В результате введения данной добавки снимается перегрев и улучшаются условия теплообмена, что благоприятно сказывается на микроструктуре слитка.

Бұл жұмыста фригитор ретінде болат балқыту және құю шлактарының металқұрамды бөлігін қолдану мүмкіндігі қарастырылған. Болат балқыту кезінде алынған шлактардың химиялық құрамы

бойынша сәйкес металқұрамды бөлігін (қалыпқа келтірілген темір мен қабыршақтар) енгізу балқытылатын болаттың химиялық құрамын өзгертусіз фригитор ретінде қолдану мүмкіндігі көрсетілген. Бұл қоспаны енгізу нәтижесінде қызып кету болмайды және жылуалмасу жағдайы жақсарады, бұл құйманың микроқұрылымына жақсы әсер етеді.

The possibility of using a metal-bearing part of steel-smelting and casting slags as frigiators is considered. It is shown that the introduction of a metal-containing part (reduced iron and korolki) of slags obtained in the process of smelting steels similar in chemical composition can be used as frigiators without changing the chemical composition of the melted steel. As a result of the introduction of this additive, overheating is removed and the heat exchange conditions are improved, which favorably affects the microstructure of the ingot.

Ключевые слова: шлак, металлосодержащая часть, корольки, фригитор, дисперсность, температура расплава.

Сталеплавильные конечные и литейные шлаки имеют сложный химический состав, который зависит, в основном, от способа выплавки и состава шихты. Источниками формирования шлака являются продукты химических реакций окисления примесей чугуна и стали, продукты разрушения футеровки, загрязнения, которые вносятся с шихтой, флюсы и твердые окислители. Согласно [1], средний состав сталеплавильного конечного шлака при выплавке среднеуглеродистой легированной стали можно охарактеризовать следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав конечного шлака, %

Fe_2O_3	FeO	SiO_2	MnO	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	MgO
3-5	9-16	8-17	9-12	42-51	2,5-4	2-3,5	6-9

Основным потребителем шлака является строительная область, которая производит щебень для строительных дорог; часть возвращается в виде окалина и скрапа в агломерационное и доменное производство; часть не используется вообще и скапливается в виде отвалов, ухудшая экологию региона.

Между тем, элементарный расчет показывает, что в 100 кг подобного шлака содержится примерно 10-12 кг железа. Помимо этого, в любом шлаке присутствуют корольки, т.е. застывшие капли выплавляемого металла. В сталеплавильных конечных шлаках их содержание составляет 3-5%, в литейных шлаках эта цифра может достигать 10-15% в зависимости от технологии литья. Корольки содержат меньше примесей, чем основной металл, т.к. лучше рафинируются. Например, содержание углерода и серы в них может быть почти в 2 раза меньше, чем в основном металле [2].

В ряде работ [3-5] отмечается возможность использования металлосодержащих отходов (металлической стружки, возврата, рудной мелочи) в качестве инокуляторов для изменения структуры при первичной кристаллизации. Причем металлосодержащие отходы в основном используются как инокуляторы-фригиторы, т.е. вводятся в расплав для снятия перегрева и улучшения условий теплообмена. Использование таких отходов в качестве инокуляторов-фригиторов определяет их количество, обычно их содержание составляет 0,5-10% от массы расплава [4].

В данной работе исследовался состав металлосодержащей части некоторых шлаков на предмет возможности их дальнейшего использования в качестве инокуляторов-фригиторов.

Для исследования были взяты пробы шлаков после выплавки сталей 30ХГС, 30ХН2М, 40ХН после выплавки их в печи ДСП-400. Состав усредненной пробы шлака после каждой плавки приведен в табл. 2, из которой видно, что состав шлаков изменяется в нешироких пределах и близок к составу шлака, приведенному в табл. 1.

Таблица 2

Химический состав пробы шлака

№ пробы	Состав, %	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO
	Плавка стали								
1	30ХГС	3,6	9,8	12	10,3	42,6	3,5	2,1	6,7
2	30ХН2М	3,9	10,2	9,5	9,2	43	3,1	1,9	6,9
3	40ХН	4,3	13,1	14,2	12,6	45,2	3,8	2,03	7,1

Каждая проба шлака подвергалась измельчению до фракции 1500 мкм при содержании фракции не менее 80%. Измельченный шлак нагревали в восстановительной среде при температуре 900 °С с целью восстановления окислов железа. Т.к. в результате измельчения сформировалась большая поверхность реагирования, то следовало ожидать достаточно интенсивной реакции восстановления. Затем измельченный шлак после восстановительного процесса подвергали воздействию магнитного поля как имитации процесса магнитной сепарации. В результате воздействия магнитного поля восстановленное железо и корольки отделялись от основной части шлака и подвергались химическому анализу. Результаты химического анализа приведены в табл. 3, сравнение данных которой с химическим составом проб выплавляемых сталей показывает, что все опытные пробы содержат меньшее количество углерода, серы и фосфора, но более высокое количество Si, Cr, Ni и Mo. Как отмечалось в [2], состав корольков отличается от состава основного сплава, т.к. они лучше рафинируются шлаком.

Таблица 3

Химический состав металлосодержащей части шлаков

Состав, %	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Mo	Fe
проба									
1	0,18	1,45	0,09	-	1,3	0,018	0,026	-	ост
2	0,21	0,36	0,9	2,01	1,07	0,02	0,023	0,56	ост
3	0,22	0,34	0,75	1,3	1,8	0,018	0,022	-	ост

Близкий состав опытных проб и повышенное содержание легирующих элементов позволяют предположить возможность их использования в качестве инокуляторов-фригиторов. Основанием для такого предположения является химический состав, близкий к составу основного металла, что, с одной стороны, не изменит качественно состав выплавляемого сплава, с другой, позволит улучшить условия теплообмена, что особенно важно для получения мелкозернистой структуры. Пробы 1-3 достаточно близки по химическому составу (табл. 3), поэтому логично предположить, что их можно использовать в качестве универсальной добавки при обработке сталей одной группы, т.е. близких по химическому составу.

Пробы 1-3 усреднялись, тщательно перемешивались, затем образовавшаяся общая проба (№ 4) подвергалась фракционному анализу с помощью аналитической просеивающей машины AS 200. Далее пробу № 4 разной фракции вводили в расплав сталей 30ХГС, 30ХН2М, 40ХН. Расплавление сталей проводили в модернизированной печи УИП-25,

разливку осуществляли в тигли КМЦ, масса слитка составляла 200 г. Опытную пробу № 4 разной дисперсности вводили в расплав с температурой 1560 °С с помощью специального устройства, позволяющего вводить пробу в глубину расплава.

В ходе эксперимента количество вводимой пробы не менялось и составляло 1,5%. После введения пробы фиксировалась температура расплава через 1 минуту после введения, после полного охлаждения слитка изучалась его микроструктура. Температуру расплава фиксировали с помощью пирометра GM1650, точность измерения 1,5°. Данные по влиянию дисперсности опытных проб на температуру расплава представлены в табл. 4, из которой видно, что введение опытной пробы приводит к снижению температуры расплава независимо от его природы, однако дисперсность пробы практически не влияет на величину этого изменения. При этом надо отметить, что при дисперсности пробы выше + 800 мкм в структуре присутствуют нерасплавившиеся частицы металла пробы (см. рис.).

Таблица 4

Влияние дисперсности пробы на температуру расплава

Дисперсность	30ХГС	30ХН2М	40ХН	Микроструктура*
без пробы	1560 °С	1560 °С	1560 °С	без включений
-500 мкм	1541 °С	1539 °С	1540 °С	без включений
500-800 мкм	1542 °С	1540 °С	1541 °С	без включений
+800 мкм	1540 °С	1541 °С	1540 °С	нерасплавившиеся частицы

*Микроструктура изучалась только на предмет наличия включений

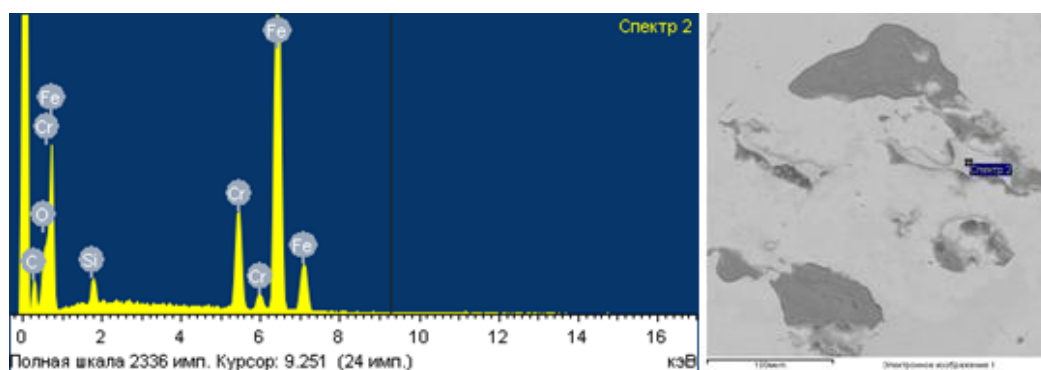


Рисунок – Наличие нерасплавившихся частиц пробы в структуре слитка

Металлическая природа данных включений была определена по химическому составу, микротвердости (средняя величина 295 HV, что ниже твердости карбидов) и дополнительным травлением. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что введение пробы дисперсностью выше +800 мкм является нецелесообразным, т.к. приводит к образованию в структуре инородных включений.

После полного охлаждения был проведен химический анализ исходных расплавов и расплавов с введенными пробами. Анализ были подвергнуты образцы с введенной пробой дисперсностью 500-800 мкм. Результаты анализа приведены в табл. 5, из которой видно, что введение пробы № 4 в количестве 1,5% от массы расплава практически не влияет на состав исходных сталей, химический состав всех испытуемых сталей после введения пробы № 4 находится в пределах, установленных соответствующими ГОСТ.

Таблица 5

Химический анализ опытных образцов

Состав, %	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Mo	Fe
Плавка стали									
30ХГС	0,28-0,34	0,9-1,2	0,8-1,1	-	0,8-1,1	≤0,025	≤0,025	-	ост
30ХГС с пробой № 4	0,29	1,05	0,9	-	1,0	0,021	0,021		
30ХН2М	0,27-0,34	0,17-0,37	0,3-0,6	1,25-1,65	0,6-0,9	≤0,025	≤0,025	0,2-0,3	ост
30ХН2М с пробой № 4	0,32	0,36	0,54	1,71	0,9	0,021	0,021		
40ХН	0,36-0,44	0,17-0,38	0,5-0,8	1,0-1,4	0,45-0,75	≤0,035	≤0,035	-	ост
40ХН с пробой № 4	0,41	0,32	0,85	1,32	0,68	0,027	0,027	-	

Проведенные исследования показали возможность использования металлосодержащей части шлаков (восстановленное железо и корольки), полученных в процессе выплавки сталей одной группы, в качестве использования инокулятора-фригитора. Оптимальной для введения в исследуемом диапазоне является фракция 500-800 мкм при количестве инокулятора 1,5%. Использование металлосодержащей части шлаков после соответствующей обработки, включающей восстановление и измельчение, в качестве фригитора позволяет снизить температуру расплава и улучшить условия теплообмена. В качестве результата подобного воздействия [4, 6] следует ожидать улучшения структуры слитка за счет уменьшения дендритной ликвации, образования дополнительных центров кристаллизации и равномерного роста зерна.

Список литературы

1. Задиранов А.Н. Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов / А.Н. Задиранов, А.М. Кац. - М.: МГИУ, 2008. - 94 с.
2. Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства. - М., Интермет Инжиниринг, 2001. - 331 с.
3. Протокилов И.В. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП / И.В. Протокилов, В.Б. Порохонько // Электрошлаковая технология. - 2014. - № 3. - С. 7-14.
4. Затуловский С.С. Суспензионное литье. - Киев, Наукова думка, 1989. - 260 с.
5. Harvey J.N., Noble G.A. Inoculation of cast irons // 55th Indian Foundry Congress. - 2007.
6. Issagulov A.Z., Kvon S.V., Kulikov V.Y., Aitbayev N.B. Studying microstructure of heat resistant steel deoxidized by barium ferrosilicon // Metalurgija. - 2016. - Т. 55. - № 3. - С. 388-390.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 29.37.15

Н.Л. КухарчукВосточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск**Е.В. Блинаева**Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск**ВЛИЯНИЕ ЗВУКОВ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ВЯЗКОСТЬ
КАЗАХСТАНСКОЙ СЫРОЙ НЕФТИ**

В статье рассматриваются результаты экспериментального воздействия звуков низкой частоты на образцы сырой нефти казахстанских месторождений. Полученные результаты свидетельствуют о снижении параметра кинематической вязкости в образцах сырой нефти. На основе полученных результатов могут быть выработаны рекомендации по применению инфразвука на нефть с целью снижения ее вязкости.

Мақалада төменгі жиіліктегі дыбыстардың Қазақстанда шығарылған шикі мұнайдың үлгілеріне эксперименттік әсерінің нәтижелері қарастырылған. Алынған нәтижелер шикі мұнай үлгілерінде кинематикалық тұтқырлық параметрінің төмендегендігін көрсетті. Алынған нәтижелер негізінде мұнайдың тұтқырлығын азайту мақсатында инфрадыбысты мұнайға қолдану жөнінде ұсыныстар әзірленуі мүмкін.

In article results of experimental impact of sounds of low frequency on samples of crude oil of the Kazakhstan fields are considered. The received results testify to decrease in parameter of kinematic viscosity in samples of crude oil. On the basis of the received results recommendations about application of an infrasound on oil for the purpose of decrease in its viscosity can be developed.

Ключевые слова: воздействие инфразвука на нефть, кинематическая вязкость нефти.

Акустическая кавитация - образование в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью, при прохождении звуковой волны большой интенсивности. В интенсивной звуковой волне во время полупериодов разрежения возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости, интенсивное излучение акустических волн и вызывая разрушение поверхностей твердых тел, граничащих с кавитирующей жидкостью.

Сырая нефть – жидкая природная ископаемая смесь углеводородов широкого физико-химического состава, которая содержит растворенный газ, воду, минеральные соли, механические примеси и служит основным сырьем для производства жидких энергоносителей (бензина, керосина, дизельного топлива, мазута), смазочных масел, битума и кокса. С химической точки зрения нефть представляет собой сложную смесь органических соединений, основу которой составляют углеводороды различного строения.

Состав и строение нефти различных месторождений нередко сильно отличаются друг от друга. Нефть, газ и газовый конденсат представляют собой смеси различных углеводородов, т.е. химических соединений углерода и водорода, различающихся числом атомов углерода С и водорода Н в каждой молекуле и ее строением [1].

Вязкость – одна из важнейших технических характеристик нефти, продуктов ее переработки, газовых конденсатов и фракций; она определяет характер процессов добычи нефти, ее поднятия на дневную поверхность, промышленного сбора и подготовку, условия перевозки и перекачки продуктов, гидродинамического сопротивления при их транспортировке по трубопроводам и др. Для некоторых видов топлив и масел вязкость служит нормированным показателем [2, 3].

Если предположить, что под воздействием звуков низкой частоты в молекулах углево-

дорогов происходит разрыв связей, то химико-физические свойства нефти после обработки инфразвуком будут отличаться от химико-физических свойств до обработки.

Авторами исследования проведен эксперимент по воздействию звуков низкой частоты на пробы сырой нефти. Результаты представлены в табл. 1-3.

Таблица 1

Входные характеристики эксперимента

№ пробы	Частота воздействия, Гц	Продолжительность воздействия, мин	Объем пробы, л
	10	15	0,5
	10	30	0,5
	10	60	0,5
	20	15	0,5
	20	30	0,5
	20	60	0,5
	26	15	0,5
	26	30	0,5
	26	60	0,5

Контрольный образец объемом 0,5 л низкочастотному воздействию не подвергался.

В результате лабораторных исследований нефти, обработанной звуками низкой частоты, установлены изменения показателей кинематической вязкости

Таблица 2

Показатели кинематической вязкости при 100 °С

№ п/п	Частота, Гц	Время, мин	Вязкость кинематическая, сСт
	10	15	2,2272
	10	30	2,1059
	10	60	2,1156
	20	15	2,1737
	20	30	2,1430
	20	60	2,1420
	26	15	2,1227
	26	30	2,1538
	26	60	2,1616

Контрольный образец, вязкость = 2,1616 сСт.

Таблица 3

Показатели кинематической вязкости при 20 °С

№ п/п	Частота, Гц	Время, мин	Вязкость кинематическая, сСт
	10	15	14,8829
	10	30	14,9117
	10	60	15,1556
	20	15	15,0988
	20	30	14,8531
	20	60	14,1374
	26	15	14,5859
	26	30	14,1723
	26	60	14,3682

Контрольный образец, вязкость = 14,9356 сСт.

Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что показатели вязкости в среднем снизились на 1 и 2% соответственно. Основанием для объяснения полученных результатов может служить математическая модель, описывающая поведение одиночного сферического кавитационного пузырька в сферической акустической стоячей волне. Рассматривается сферическая колба, наполненная жидкостью, в которой создано акустическое поле в виде сферической стоячей волны. Распределение давления как решение линейного волнового уравнения в сферической геометрии может быть записано в виде:

$$p(r, t) = p_0 + \frac{\sin(kr)}{kr} p_a(t). \quad (1)$$

Здесь p_0 - начальное однородное (атмосферное) давление; $p_a(t) = -P_a \sin(\omega t)$ - акустическое давление в центре сферической колбы с амплитудой P_a ; r - радиальная координата; $k = \omega / C_l$ - волновое число акустического поля; C_l и ω - скорость звука в жидкости и частота акустической волны соответственно.

Трансляционное движение пузырька в акустическом поле происходит под действием нескольких сил: силы плавучести, силы Бьеркнеса, силы сопротивления и силы присоединенных масс.

Сила плавучести имеет вид:

$$\vec{F}_b = -V_b (\rho_l - \rho_g) \vec{g}. \quad (2)$$

Здесь $V_b = (4/3) \pi R^3$ - объём пузырька, R - радиус пузырька, ρ_l - плотность жидкости; $\rho_g = \rho_{g0} (R_0 / R)^3$ - плотность газа в пузырьке, R_0 - невозмущённый радиус пузырька.

Сила Бьеркнеса имеет вид:

$$\vec{F}_B = -V_b \vec{\nabla} p(r, t). \quad (3)$$

Сила сопротивления. В рамках Стоксовой аппроксимации использовано решение Адамара-Рыбчинского для медленного движения жидкого сферического тела, откуда и получена формула для силы, действующей на движущийся в жидкости пузырёк:

$$\vec{F}_d = C_d \pi R^2 \frac{\rho_l \|\vec{v}_l\| (\vec{v}_l - \vec{v}_b)}{2} = 4\pi \mu_l R (\vec{v}_l - \vec{v}_b). \quad (4)$$

Сила присоединённой массы имеет вид:

$$\vec{F}_a = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[V_b \rho_l (\vec{v}_l - \vec{v}_b) \right]. \quad (5)$$

Сумма всех сил даёт уравнение для движения пузырька в акустическом поле:

$$m_b \frac{d\vec{v}_b}{dt} = \vec{F}_b + \vec{F}_B + \vec{F}_a + \vec{F}_d, \quad (6)$$

где $m_b = \rho_g V_b = \text{const}$ - масса пузырька.

Подставляя в уравнение (6) формулы (2)-(5) и используя тот факт, что поле акустического давления и скорости жидкости связаны формулой $\vec{\nabla} p = -\rho_l d\vec{v}_l/dt$, получим, пренебрегая массой пузырька по сравнению с массой жидкости, следующее векторное обыкновенное дифференциальное уравнение для скорости пузырька:

$$\dot{v} = 3\dot{v}_l - 2\vec{g} - \left(\frac{9v_l}{R^2} + \frac{3\dot{R}}{R} \right) (\vec{v}_b - \vec{v}_l), \quad (7)$$

где точкой обозначены производные по времени.

В полярной системе координат (r, θ) уравнение (7) представляется следующими скалярными уравнениями

$$\dot{r} - r\dot{\theta}^2 = 3\dot{v}_l + (v_l - r) \left(\frac{9v_l}{R^2} + \frac{3\dot{R}}{R} \right) + 2g \cos \theta, \quad (8)$$

$$r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} = 3v_l + 3v_l\dot{\theta} - r\dot{\theta} \left(\frac{9v_l}{R^2} + \frac{3\dot{R}}{R} \right) - 2g \sin \theta, \quad (9)$$

где
$$v_l = -\frac{P_a}{\omega \rho_l} \cos \omega t \left(\frac{\cos kr}{kr} - \frac{\sin kr}{kr^2} \right), \quad (10)$$

$$\dot{v}_l = -\frac{P_a}{\rho_l} \sin \omega t \left(\frac{\cos kr}{kr} - \frac{\sin kr}{kr^2} \right). \quad (11)$$

Объединим уравнения (8)-(11), описывающие трансляционное движение пузырька, с уравнением, описывающим радиальные колебания одиночного пузырька в вязкой слабосжимаемой жидкости [2]:

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{C_l} \right) R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3C_l} \right) = \left(1 + \frac{\dot{R}}{C_l} \right) \frac{p_R - p(r, t)}{\rho_l} + \frac{R}{\rho_l C_l} \frac{d}{dt} (p_R - p(r, t)), \quad (12)$$

$$p_R = \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_l}{R} \dot{R}.$$

Здесь $p(r, t)$ - акустическое давление, которое описывается уравнением (1); p_R - давление в жидкости около стенки пузырька, σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Полученная модель (система уравнений (8)-(12)) описывает поведение одиночного сферического кавитационного пузырька в сферической акустической стоячей волне.

Построим алгоритм решения уравнения (12). Рассмотрим вспомогательную задачу [3]:

$$\ddot{R} = v \quad (13)$$

$$R|_{t=0} = R_0$$

$$R|_{t=t_0} = R_1,$$

где
$$A = \frac{d^2}{dt^2}.$$

Эта задача однозначно разрешима при любом $v \in L_2$.

Предположим, что найдется линейный оператор такой, что оператор $Mv = B(LA^{-1}v)$ непрерывен. В решении уравнения (13) операторной форме $u = A^{-1}v$, т.е. решение ищем в таком виде и на полученное уравнение подействуем оператором B . Тогда имеем

$$Mv = f, \quad (14)$$

где
$$f = \left(1 + \frac{\dot{R}}{C_l} \right) \frac{p_R - p(r, t)}{\rho_l} + \frac{R}{\rho_l C_l} \frac{d}{dt} (p_R - p(r, t)).$$

Для построения метода приближенного решения уравнения (14) на оператор M наложим некоторые условия.

Предполагаем, что при $\varepsilon \in (-\varepsilon_0, \varepsilon)$ выполнены условия (15)-(18):

$$\|D(u, v, \varepsilon)\| = \left\| \frac{M(u + \varepsilon v) - M(u)}{\varepsilon} - M'(u)v \right\| \leq \varepsilon F(\|u\|, \|v\|) \cdot \|v\|, \quad (15)$$

$$\|M'(u)\| \leq c_1(\|u\|), \quad (16)$$

$$\|u\| \leq c_2(\|Mu\|), \quad (17)$$

$$\|M'^{-1}(u)\| \leq c_3(\|u\|), \quad (18)$$

где $F(\cdot, \cdot)$, $c(\cdot)$, $(j = 1, 2, 3)$ - непрерывные и монотонные неубывающие функции своих аргументов; M' - оператор, первая вариация по u M ; M'' - сопряженный оператор к оператору M' .

Обозначим $J(v) = \int_0^1 |Mv - f|^2 dt = \|Mv - f\|^2$. Чтобы найти приближенное решение

уравнения (14), минимизируем этот функционал [4]. Составим итерационный процесс:

$$u_{n+1} = u_n - \delta_0 M'^*(u_n)(M(u_n) - f), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

(δ_0 - произвольно, но от него зависит u_0).

Полученная модель, описывающая поведение одиночного сферического кавитационного пузырька в акустической сферической стоячей волне, была выбрана для изучения влияния низкочастотных звуков на сырую нефть.

Список литературы

1. Каминский Э.Ф. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты / Э.Ф. Каминский, В.А. Хавкин. - М., 2001.
2. Рябов В.Д. Химия нефти и газа. - М., Техника, 2004.
3. Васильев Г.Г. Трубопроводный транспорт нефти / Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробов, А.А. Коршак и др. / Под ред. М.С. Вайнштока. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. - Т 1. - 408 с.
4. Мырзакожа Д.А. Современные методы исследования / Д.А. Мырзакожа, А.А. Мирзаходжаев. - Алматы, 2006. - 303 с.
5. Ауэзова Г.А. Исследование состава отдельных фракций нефтей Акшабулак и Жетыбай методом хромато-массспектрометрии / Г.А. Ауэзова, Г.С. Татыханова, А.Ж. Иматова. - Вестник КазНТУ. - № 6 (82). - С. 2010-1224.
6. Журавлева Е.Д. Нефти и породы Тенгизского месторождения. - М. - Деп. в ВИНТИ, 22.11.90, № 5877-В 90.
7. Букейханов Н.Р. Новые нефти Казахстана / Н.Р. Букейханов, Б.У. Уразгалиев. // Междунар. конф. по химии нефти: Тезисы докладов. - Томск, 1992. - С. 346.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 28.23.37

А.А. Савостин, Г.В. СавостинаСеверо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
г. Петропавловск**ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

В статье рассматривается метод использования искусственных нейронных сетей для классификации электрокардиографических данных. Найдены оптимальный вектор входных параметров и архитектура нейронной сети, способной распознать инфаркт миокарда определенной локализации на фоне данных электрокардиограмм здоровых людей. Выполнена тренировка сети на подготовленной обучающей выборке. На основании полученных экспериментальных данных сделаны выводы об эффективности использования предложенного метода и возможностях его применения для выявления других патологических изменений в электрокардиосигналах.

Мақалада электрокардиографиялық деректерді жіктеу үшін жасанды нейрондық желілерді қолдану әдісі қарастырылады. Сау адамның электрокардиограммасының фонында белгілі бір локализацияның миокард инфарктісін тани алатын кіріс параметрлері мен нейрондық желі құрылымының оңтайлы векторы тыбылды. Дайындалған оқыту үлгісінде желіні машықтандыру өткізілді. Эксперименттік деректер негізінде ұсынылған әдістердің тиімділігі туралы және оларды электрокардиосигналдардағы басқа патологиялық өзгерістерді анықтау үшін қолдану мүмкіндіктері туралы тұжырымдар жасалды.

This article considers the method of using artificial neural networks for the classification of electrocardiographic data. The article found the optimal vector of input parameters and the architecture of a neural network capable of recognizing a myocardial infarction of a certain localization against the background of electrocardiograms of healthy people. A network training was conducted on the prepared training sample. Conclusions are drawn about the effectiveness of using the proposed method and the possibilities of its application for detecting other pathological changes in electrocardiograms based on the experimental data.

Ключевые слова: электрокардиограмма, ЭКГ, классификация, нейронная сеть.

На сегодняшний день автоматизированный анализ электрокардиограмм (ЭКГ) человека представляет собой достаточно сложную теоретическую и практическую задачу. Это в первую очередь связано с физиологическим происхождением электрокардиосигнала, которое обуславливает его недетерминированность, разнообразие и изменчивость, нестационарность и подверженность многочисленным видам помех. Т.е. проблема интерпретации ЭКГ приобретает все признаки плохо формализованной задачи. Данный тип задач обычно не имеет четких и явных алгоритмов решения, поскольку в их условие входит большое число сложно комбинирующихся факторов. Поэтому большое значение приобретает опыт – явная или неявная память о предыдущих ситуациях, подразумевающий правильное принятие решения не только в случае повторения ситуации, но и при возникновении не встречавшейся ранее [1]. В связи с этим в задачах автоматизированной классификации электрокардиографических данных вполне обосновано ожидать положительного эффекта от использования искусственных нейронных сетей (ИНС) с их способностью к обучению и обобщению полученных знаний.

Основываясь на вышесказанном, в данной работе авторы предлагают подход к решению задачи интерпретации ЭКГ методами автоматизированного анализа и классификации при помощи аппарата ИНС для поддержки принятия решений врачом-кардиологом.

ЭКГ человека фиксируются на поверхности тела с помощью различных систем отведений. В клинической электрокардиографии получили наиболее широкое распространение 12 ЭКГ-отведений: 3 стандартных, 3 усиленных однополюсных отведений от конечностей и 6 грудных отведений [2]. При этом для выявления патологий сердечной дея-

тельности производится анализ формы и длительности соответствующих элементов ЭКГ, полученных в определенных отведениях, на предмет их отклонения от нормы (рис. 1).

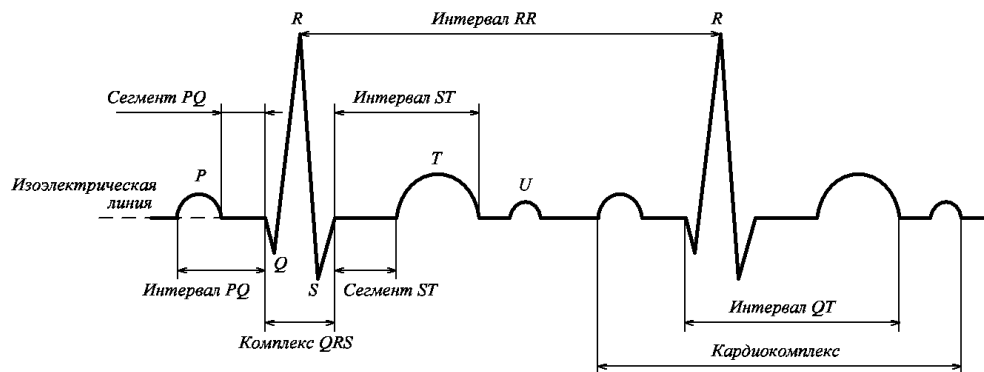


Рисунок 1 – Схематическое изображение элементов нормальной ЭКГ

Это объясняется тем, что форма ЭКГ в отведениях определяется величиной и направлением вектора электродвижущей силы сердца в соответствующих им фронтальных или горизонтальных плоскостях. Поэтому по отклонению ЭКГ от нормы можно выявить наличие патологии и ее пространственное расположение.

Так, при диагностировании острого инфаркта миокарда должны быть проанализированы различные комбинации из 12 отведений для определения его локализации. К примеру, при заднедиафрагмальном (нижнем) инфаркте миокарда характерные признаки в изменении ЭКГ проявляются в отведениях от конечностей II, III, aVF и в грудных отведениях V₁–V₄ [2]. Другие локализации требуют анализа своих групп отведений.

Различным патологиям сердечно-сосудистой системы (ССС) соответствует свой набор характерных признаков изменения формы ЭКГ в 12 отведениях. Поскольку количество известных заболеваний ССС весьма велико и требует анализа комплекса элементов ЭКГ (рис. 1) в нескольких отведениях, то, по мнению авторов, при автоматизированном анализе и классификации ЭКГ целесообразно выбрать путь создания отдельных алгоритмов по интерпретации узкого класса патологий. Объединение таких алгоритмов в единый кластер позволит обеспечить гибкость, функциональность и масштабируемость процесса интерпретации ЭКГ, а применительно к аппарату ИНС позволит избежать явления «проклятия размерности» [3].

Таким образом, задача исследования заключается в создании методики проектирования ИНС, способной классифицировать определённый класс заболеваний ССС по данным ЭКГ в стандартных отведениях. Для этого используются данные ЭКГ острого инфаркта миокарда (локализация – нижний, далее НИМ) и здоровых людей.

При формировании обучающего набора данных ИНС в работе была использована открытая база записей The PTB Diagnostic ECG Database [4]. Все исходные сигналы ЭКГ были обработаны банком цифровых фильтров для устранения влияния аддитивных помех.

Для выделения низкочастотного дрейфа изолинии [5] применялась фильтрация во временной области при помощи фильтра скользящего среднего. Обработка сигнала выполнялась в два этапа: на первом этапе – с размером окна $L_1 = 0,3f_s$, на втором – $L_2 = 0,67f_s$, где f_s – частота дискретизации. Для подавления высокочастотных помех использовалась последовательная обработка сигналов фильтрами Баттерворта шестого порядка $N = 6$ с частотой среза $f_{LP} = 75$ Гц и режекторным фильтром второго порядка $N = 2$ с частотой

режекции на $f_c = 50$ Гц. Благодаря удалению низкочастотной составляющей ЭКГ-сигналы на выходе фильтров оказываются центрированными относительно нуля.

Как отмечалось, НИМ проявляется в изменении формы ЭКГ в отведениях II, III, aVF, $V_1 - V_4$. При этом типичными признаками инфаркта миокарда являются патологический зубец Q или комплекс QS, уменьшение амплитуды зубца R, подъем сегмента RST (ST) и отрицательный зубец T (рис. 1) [2]. Очевидно, что данные признаки будут определять объект НИМ, а их количественные характеристики могут определить вектор входных параметров ИНС.

Для детектирования перечисленных признаков на ЭКГ в работе использовались алгоритмы и программные функции [6], основанные на классическом алгоритме поиска R зубца Пана-Томпкинса [7]. При этом производилось извлечение из кардиокомплексов зубца Q (от начала QRS комплекса до вершины зубца R), сегмента ST и зубца T (рис. 1).

Как показала практика применения указанных инструментов, в силу нестационарности сигнала детектированные элементы ЭКГ в пределах одного отведения очень часто существенно отличались друг от друга по форме и длительности. Это еще раз доказывает сложность использования методов классификации ЭКГ по эталонным образцам и подтверждает обоснованность применения аппарата ИНС с самостоятельным выбором признаков в процессе обучения. Использование ИНС совместно с известными алгоритмами детектирования позволит уменьшить число ошибок классификации, возникающих из-за априорной ограниченной чувствительности данных алгоритмов.

С учетом этого для количественной оценки детектированных элементов ЭКГ как дискретного сигнала $s_i(kT)$ в работе использовались следующие характеристики: $Int(s_i)$ – определенный интеграл от функций исследуемых элементов ЭКГ s_i как мера оценки энергии сигнала; σ – среднеквадратическое отклонение элементов ЭКГ s_i как мера неопределенности.

В процессе формирования обучающей выборки была проделана обширная работа по анализу записей сигналов, входящих в используемую базу данных [4]. Поскольку форма элементов ЭКГ весьма изменчива, удалось отобрать 453 кардиокомплекса с детектированными элементами ЭКГ, принадлежащих здоровым людям, и 479 с диагнозом НИМ, итого $M = 932$ кардиокомплекса. При отборе данных ставилась задача максимально отразить в обучающей выборке разнообразие форм ЭКГ в норме и при патологии в оптимальных пропорциях.

Набор входных параметров ИНС представлен вектором p из $R = 18$ элементов (табл. 1). Каждому объекту ставится в соответствие результат в виде вектора y , причем $y^{(m)} = \{0, 1\}$ соответствует ЭКГ здорового человека, а $y^{(m)} = \{1, 0\}$ свидетельствует о наличии НИМ ($m = 1, 2, \dots, M$).

На основании эмпирического поиска и существующих методов моделирования ИНС [8] для классификации объектов ЭКГ в работе используется многослойная нейронная сеть прямой передачи сигнала (рис. 2), содержащая слои входной, скрытый и выходной.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: вектор входа p^i с R элементами $p_1, p_2, p_3, \dots, p_R$; матрица весов входа W^{11} и выхода W^{21} соответственно (верхние индексы указывают слой-адресат и слой-источник); b – вектор смещения (здесь и далее одиночный верхний индекс указывает на номер слоя); S^1 – число нейронов в скрытом слое; S^2 – число нейронов в выходном слое; $n^1 = W^{11} * p + b^1$, $n^2 = W^{21} * p + b^2$ – смещение суммируется со взвешенной суммой входов и служит аргументом для активационной функции слоя f^1 и f^2 ; a^1 – выход скрытого слоя, $a^2 = y^i$ – выход последнего слоя, являющийся выходом сети.

Таблица 1

Набор входных признаков моделируемой ИНС

Объек- ты $p^{(m)}$	Исходные признаки													Результаты $y^{(m)}$	
	II						III			avF					
	Q		ST		T		Q	S T	T	Q	S T	T			
	$Int(s_i)$)	σ	$Int(s_i)$)	σ	$Int(s_i)$)	σ$	...	...	...	...	...	Int(s_i)$)	σ		
$p_{Rxl}^{(1)}$	p_1^I	p_2^I	p_3^I	p_4^I	p_5^I	p_6^I	...	...	...	...	...	p_{17}^I	p_{18}^I	y_1^I	y_2^I
...
$p_{Rxl}^{(M)}$	p_1^{932}	p_2^{93}	p_4^{932}	p_5^{93}	p_7^{932}	p_8^{93}	...	...	...	...	...	p_{17}^{932}	p_{18}^{93}	y_1^{932}	y_2^{932}

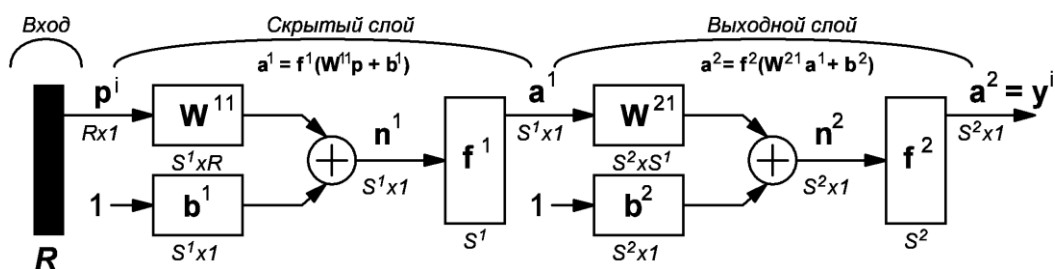


Рисунок 2 – Архитектура искусственной нейронной сети

Число входов равно размерности вектора признаков исследуемого объекта $R = 18$ в соответствии с табл. 1. В скрытом слое используется $S^1 = 20$ нейронов с сигмоидальной активационной функцией f^1 :

$$f^1(n_j) = \text{sigmoid}(n_j) = \frac{1}{1 + e^{-n_j}}, \quad (1)$$

где n_j – j -й элемент вектора n^1 при $j = 1, 2, \dots, S^1$.

Поскольку количество детектируемых классов равно двум, то в выходном слое используются два нейрона $S^2 = 2$ с активационной функцией f^2 softmax:

$$f^2(n_j) = \text{softmax}(n_j) = \frac{e^{n_j}}{\sum_{k=1}^{S^2} e^{n_k}}, \quad (2)$$

где n_j – j -й элемент вектора n^2 при $j = 1, 2, \dots, S^2$. Результат функции softmax есть преобразование входного вектора n^2 размерности $S^2 \times 1$ в вектор a^2 той же размерности (рис. 2), где каждая координата полученного вектора представлена вещественным числом в интервале (0,1), показывающим вероятность того, что соответствующий класс будет истинным.

Для обучения сети использовался алгоритм с обратным распространением ошибки SCG (Scaled Conjugate Gradiene) [3]. Моделирование и обучение сети производилось в программе MATLAB 8.

На рис. 3, а показана зависимость величины ошибки обучения от числа циклов обучения.

В качестве параметра ошибки используется средняя кроссэнтропия по всем учебным примерам M :

$$C = -\frac{1}{M} \sum_{m \in M} \sum_{j=1}^{S^2} y_j^{(m)} \log a_j^{(m)}, \quad (3)$$

где $a^{(m)}$ – предсказание классификатора для текущего обучающего примера; $y^{(m)}$ – требуемый выход для текущего примера.

Как следует из рис. 3, а, обучение ИНС было остановлено на 76 цикле, так как обобщающая способность сети по контрольной выборке (обозначена как «Validation» на рис. 3) начала ухудшаться. При этом на 70 цикле классификатор достиг минимизации функции ошибки (3) в пространстве весов.

На рис. 3, б показана ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic) для полученного классификатора, показывающая зависимость истинно положительного множества TPR от ложноотрицательного FPR [6]. Форма ROC-кривой на рис. 3, б близка к идеальному случаю, когда функция проходит через точку с координатой (0, 1), т.е. когда классификатор не делает ошибок ($FPR = 0$, $TPR = 1$).

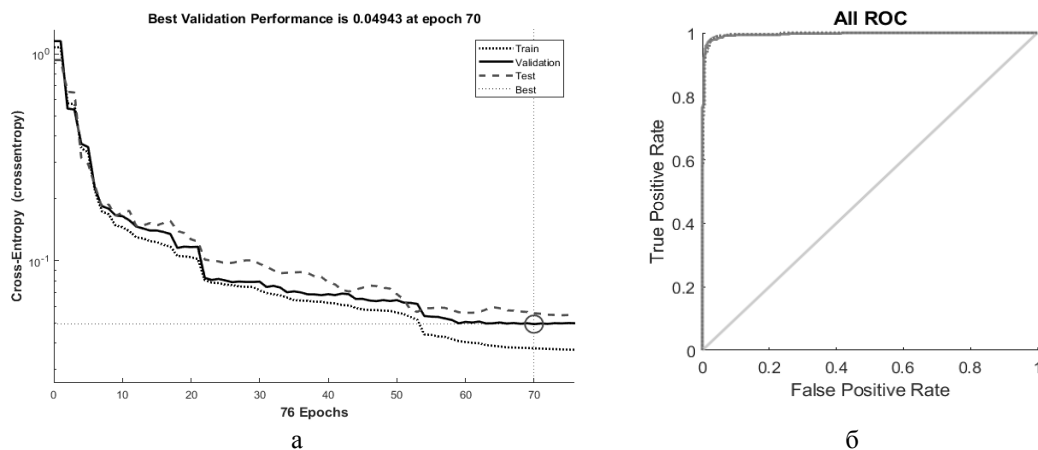


Рисунок 3 – Результаты обучения ИНС: а – зависимость величины ошибки обучения от числа циклов обучения; б – ROC-кривая

Полученные метрики обучения ИНС показывают, что доля правильных ответов классификатора (*accuracy*) составляет около 98%. Однако из-за некоторой неравномерности обучающей выборки целесообразно ориентироваться на величину *precision* и *recall*, показанных в табл. 2, в которой для объединения *precision* и *recall* в агрегированный критерий качества используется F-мера как среднее гармоническое *precision* и *recall* [9]:

$$F_\beta = (1 + \beta^2) \frac{Precision \cdot Recall}{(\beta^2 Precision) + Recall}, \quad (4)$$

где $\beta = 1$ определяет вес точности в метрике.

Таблица 2

Полученные значения *precision* и *recall* для каждого класса по всей обучающей выборке

Класс	<i>Precision</i> , %	<i>Recall</i> , %	F-мера
Положительный (НИМ)	98,5	96,7	0,98
Отрицательный (здоровые)	96,5	98,5	0,97
Среднее	97,5	97,6	0,98

Как следует из данных табл. 2, ИНС делает больше ошибок первого рода, что при решении задачи классификации ЭКГ является более приемлемым вариантом.

На основании полученных результатов можно утверждать об эффективности предложенного метода бинарной классификации электрокардиологических данных с применением ИНС. Используя описанный в работе подход, можно производить оценку сигналов по другим отведениям на предмет поиска инфарктов отличной локализации, а также иных патологий ССС человека. Также, используя описанный в статье принцип формирования вектора входных признаков, возможно модернизировать архитектуру ИНС для выполнения многоклассовой классификации ЭКГ.

Список литературы

1. Магрупов Т.М. Анализ и обработка медико-биологической информации / Т.М. Магрупов, С.А. Васильева, М.Т. Магрупова. – Т.: ТашГТУ, 2012. – 152 с.
2. Мурашко В.В. Электрокардиография: Учеб. пособие / В.В. Мурашко, А.В. Струтынский. – 12-е изд. – М.: МЕДпресс-информ, 2014. – 320 с.
3. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
4. Goldberger A.L., Amaral L.A., Glass L. et. al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*. 2000. № 101(23). PP. 215-220.
5. Kligfield P., Gettes L.S., Bailey J.J., et al. Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram. Part I. AHA/ACC/HRS Scientific Statements. *Circulation*. 2007. № 115. PP. 1306-1324.
6. Silva I., Moody G. An Open-source Toolbox for Analysing and Processing PhysioNet Databases in MATLAB and Octave. *Journal of Open Research Software*. № 2(1). 2014.
7. Pan J. F., Tompkins W.J. Real-time QRS-detection algorithm / Pan J.F., Tompkins W.J. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1985. № 32(3). PP. 230-236.
8. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / Пер. с англ. - 2-е изд. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
9. Davis J., Goadrich M. The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves. // *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. Pittsburgh, PA. 2006.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 55.13.99

А.Ж. Таскарина, Г.Т. Итыбаева, Ж.К. Мусина, А.Ж. Касенов

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ РЕЗЦОВОЙ СБОРНОЙ РАЗВЁРТКОЙ С ЖЁСТКИМ КРЕПЛЕНИЕМ БЕЗВЕРШИННЫХ ЗУБЬЕВ

Выполнены экспериментальные исследования обработки отверстий сборной резцовой развёрткой с использованием математического аппарата многофакторного эксперимента типа 2^3 . В качестве параметров оптимизации выбраны: отклонение диаметра и шероховатость; факторов: частота вращения шпинделя, подача и длина обработки. Выполнен статистический анализ полученного уравнения регрессии (критерий Стьюдента и критерий Фишера). По полученным адекватным моделям вычислено значение исследуемого параметра (отклонение диаметра, шероховатость поверхности) при любом сочетании значений факторов, находящихся в области экспериментирования.

2^3 типті көп факторлы математикалық аппаратты пайдалана отырып кескіш құрамалы ұңғылағышпен тесіктерді өңдеуге, эксперименттік зерттеулер жасалды. Оңтайландыру параметрлері ретінде диаметрінің ауытқуы және кедір-бұдырлығы; факторлар: шпиндельдің айналу жиілігі, беріс және өңдеу ұзындығы таңдалды. Алынған теңдеу регрессияларына (Стьюдент критерийі мен Фишер критерийі) статистикалық талдау жасалды. Эксперимент аумағында орналасқан факторлар мәндерінің кез келген үйлесімі үшін алынған барабар модельдер арқылы, зерттелетін параметрдің (диаметр ауытқуы, беттің кедір-бұдырлығы) мәні есептелді.

Experiments were carried out with the use of mathematical tools such as multi-factor experiment 2^3 . As the optimization parameter, the following elements have been selected: deviation diameter and the burr; factors: frequency of spindle speed, feed and the length of treatment. We carry out a statistical analysis of the results of the regression equation (Student criterion and Fisher's exact test). According to the yielded findings, adequate model we calculate the value of the studied parameters (diameter deviation, surface roughness) for any combination of values of the factors that are in the area of experimentation.

Ключевые слова: резание, отверстие, развёртка, качество, точность, шероховатость (поверхности), эксперимент, факторы, модель.

Повышение эффективности исследований возможно с применением математических методов и построения математической теории планирования эксперимента [1, 2].

Экспериментальные исследования проведены с применением математического аппарата многофакторного эксперимента типа 2^3 . В качестве параметров оптимизации выбрано отклонение диаметра, шероховатость, а в качестве факторов – частота вращения шпинделя, подача и глубина резания (табл. 1).

Обработка отверстий резцовой сборной развёрткой с жёстким креплением безвершинных зубьев осуществлялась на вертикально-сверлильном станке модели 2A135. Обработка отверстий диаметром $d = 45$ мм, длиной 20, 45 и 90 мм из стали 45 производилась со смазывающе-охлаждающей жидкостью (Укринол-1) и без неё.

Таблица 1

Значения варьируемых факторов

Уровни варьирувания факторов	Значения факторов					
	частота вращения, n		подача, S		глубина резания, t	
	нат.	код.	нат.	код.	нат.	код.
	об/мин	X_1	мм/об	X_2	мм	X_3
Основной	114	0	0,9	0	0,375	0
Верхний	160	+1	1,60	+1	0,5	+1
Нижний	68	-1	0,20	-1	0,25	-1
Интервал варьирования	46	ΔX_1	0,7	ΔX_2	0,125	ΔX_3

По [3, с. 381–382] рассчитываем глубину резания, скорость резания и подачу, далее, учитывая паспортные данные вертикально-сверлильного станка модели 2A135, устанавливаем пределы варьирования (верхний и нижний) и составляем матрицу планирования [4]. Согласно матрице планирования проводим экспериментальные исследования, выполняем необходимые вычисления по известным формулам, приведенным в [5-7], и полученные результаты сводим в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов на отклонение отверстий Ø 45 мм при l = 45 мм

№ опыта			Результаты опытов, y_{il}			Среднее значение, \bar{y}	Дисперсия, S_i^2	Параметр оптимизации, \hat{y}
1	9	17	45,010	44,998	45,014	45,0073	$0,0693 \cdot 10^{-3}$	44,967
2	10	18	45,000	45,002	45,008	45,0033	$0,0173 \cdot 10^{-3}$	45,044
3	11	19	45,016	45,012	45,016	45,0147	$0,0053 \cdot 10^{-3}$	45,056
4	12	20	46,000	45,016	45,020	45,3453	$3,2144 \cdot 10^{-1}$	45,305
5	13	21	45,012	45,010	45,016	45,0127	$0,0093 \cdot 10^{-3}$	45,009
6	14	22	45,008	44,998	45,010	45,0053	$0,0413 \cdot 10^{-3}$	44,965
7	15	23	46,000	45,012	45,016	45,3427	$3,2340 \cdot 10^{-1}$	45,302
8	16	24	45,014	46,000	45,016	45,3433	$0,9181 \cdot 10^{-1}$	45,384

По m параллельным опытам находится среднее значение функции отклика каждой строки матрицы планирования:

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m y_{il} \quad 1 = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где y_{il} – значение функции отклика в l -м параллельном опыте; i – номер опыта в матрице планирования; N – число опытов в матрице планирования.

В первом опыте среднее значение равно:

$$y_1 = (45,010 + 44,998 + 45,014) / 3 = 45,0073.$$

Аналогично определены средние значения y_i в других опытах (табл. 3).

Прежде чем приступить к определению модели эксперимента в виде уравнения регрессии, необходимо произвести проверку воспроизводимости эксперимента для исследуемого объекта.

Проверяем гипотезу однородности дисперсии по G -критерию Кохрена:

$$G = S_{i\max}^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (2)$$

Оценка дисперсии опыта:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m (y_{il} - y_i)^2, \quad (3)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{(3-1)} [(45,010 - 45,0073)^2 + (44,998 - 45,0073)^2 + (45,014 - 45,0073)^2] = 0,0693 \cdot 10^{-3}.$$

Полученные значения S_i^2 для других опытов представлены в табл. 3.

Определяем дисперсию ошибки опыта:

$$S_{ou}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{0,737}{8} = 0,092. \quad (4)$$

Определяем максимальное значение дисперсии:

$$S_{i\max}^2 = 0,324.$$

Сумма дисперсий:

$$\sum S_i^2 = 0,737$$

$$G = 0,324 / 0,737 = 0,439$$

Табличное значение критерия при 5%-м уровне значимости равно $G_{\text{табл}} = 0,5157$ [3, с. 10]. Полученное значение критерия меньше табличного, поэтому эксперимент считается воспроизводимым.

После оценки воспроизводимости эксперимента определяем величины коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{iq} \cdot y_i; q=0 \dots n, \quad (5)$$

где z_{iq} – табл. 3; n – число коэффициентов.

$$b_0 = \frac{1}{8} (45,0073 + 45,0033 + 45,0147 + 45,3453 + 45,0127 + 45,0053 + 45,3427 + 45,3433) = 45,134;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-45,0073 + 45,0033 - 45,0147 + 45,3453 - 45,0127 + 45,0053 - 45,3427 + 45,3433) = 0,040;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (-45,0073 - 45,0033 + 45,0147 + 45,3453 - 45,0127 - 45,0053 + 45,3427 + 45,3433) = 0,127;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} (-45,0073 - 45,0033 - 45,0147 - 45,3453 + 45,0127 + 45,0053 + 45,3427 + 45,3433) = 0,042.$$

Затем проводим проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии. Для этого определяем дисперсии коэффициентов:

$$S^2\{b_q\} = \frac{S_{ou}^2}{m \sum_{i=1}^m z_{iq}^2} = \frac{0,092}{3 \cdot 8} = 0,0038 \quad (6)$$

и среднеквадратичное отклонение:

$$S\{b_q\} = \sqrt{S^2\{b_q\}} = \sqrt{0,0038} = 0,062. \quad (7)$$

Табличное значение t-критерия для 5%-го уровня значимости и числа степеней 8 (3-1) = 16 равно 2,12 распределения Стьюдента [3, с. 13]. Вычисляем критическое значение коэффициентов уравнения регрессии из формулы 8:

$$t_q = \frac{|b_q|}{S\{b_q\}}, \quad (8)$$

$$b_{q\text{кри}} = t_{\text{крит}} \cdot S\{b_q\} = 2,12 \cdot 0,062 = 0,131$$

Значение b_q меньше $t_{\text{крит}}$, поэтому его можно признать статистически незначимым и исключить из уравнения регрессии. Тогда интерполяционная модель примет вид:

$$y = 45,134 + 0,040x_1 + 0,127x_2.$$

Для проверки адекватности полученной модели необходимо вычислить остаточную дисперсию, предварительно вычисляя параметр оптимизации \hat{y}_i :

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N m(y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (9)$$

где d – число значимых коэффициентов в модели, $d = 7$; y_i – значение функции отклика, вычисленное по полученной модели для условий i -го опыта.

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{8-7} [3(45,0073-44,967)^2 + 3(45,0033-45,044)^2 + 3(45,0147-45,056)^2 + \dots + 3(45,3433-45,384)^2] = 0,035.$$

Однородность дисперсий $S_{ост}^2$ и $S_{ои}^2$ проверяется с помощью F -критерия, сопоставляя расчётное значение критерия Фишера с табличным [3, с. 14].

$$F = \frac{S_{ост}^2}{S_{ои}^2} = \frac{0,035}{0,092} = 0,38 < 2,85 = F_{табл}. \quad (10)$$

Так как $F < F_{табл}$, то модель адекватно описывает процесс, то есть признаётся пригодной.

Чтобы получить модель в натуральных переменных n , S , необходимо вместо X_1 , X_2 подставить выражения:

$$X_1 = \frac{2(\ln \bar{X}_1 - \ln 160)}{\ln 160 - \ln 68} + 1, \quad X_2 = \frac{2(\ln \bar{X}_2 - \ln 1,60)}{\ln 1,60 - \ln 0,20} + 1. \quad (11)$$

Формулы преобразования получены путём подстановки верхних и нижних уровней факторов в выражение (7):

$$\ln d = 45,134 + 0,040 \left[\frac{2(\ln n - \ln 160)}{\ln 160 - \ln 68} + 1 \right] + 0,127 \left[\frac{2(\ln S - \ln 1,60)}{\ln 1,60 - \ln 0,20} + 1 \right]. \quad (12)$$

Решая выражение (12), находим зависимость отклонения диаметра от исследуемых факторов процесса обработки отверстия.

При длине 45 мм:

$$\Delta d = 0,0057 \frac{S^{0,114}}{n^{0,094}}. \quad (13)$$

Согласно формулам (1)-(10) определяем зависимость отклонения диаметра от исследуемых факторов процесса обработки отверстия при $l = 20$ мм и $l = 90$ мм.

При длине 20 мм:

$$\Delta d = 0,0032 \frac{S^{0,084}}{n^{0,077}}. \quad (14)$$

При длине 90 мм:

$$\Delta d = 0,009 \frac{S^{0,261}}{n^{0,184}}. \quad (15)$$

Аналогично по вышеописанной методике выполнены необходимые вычисления шероховатости поверхности отверстия Ø 45 мм (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчёта шероховатости поверхности отверстия Ø 45 мм при длине 45 мм

№ опыта			Результаты опытов, y_{ij}			Среднее значение, \bar{y}	Дисперсия, S_i^2	Параметр оптимизации, \hat{y}
1	9	17	0,160	0,200	0,250	0,2033	0,0020	0,233
2	10	18	0,125	0,150	0,130	0,1350	0,0002	0,105
3	11	19	0,300	0,400	0,400	0,3667	0,0033	0,337
4	12	20	0,600	0,800	0,600	0,6667	0,0133	0,696
5	13	21	0,200	0,600	0,600	0,4667	0,0533	0,275
6	14	22	0,125	0,160	0,200	0,1617	0,0014	0,191
7	15	23	0,400	0,600	0,400	0,4667	0,0133	0,496
8	16	24	0,800	0,750	0,750	0,7667	0,0918	0,737

На основании данных табл. 3 выполнены соответствующие расчёты и получены зависимости шероховатости поверхности отверстия Ø 45 мм от частоты вращения, подачи и глубины резания для следующих длин:

– при длине 45 мм:

$$Ra = 1,44 \frac{S^{0,441}}{n^{0,312}}; \quad (16)$$

– при длине 20 мм:

$$Ra = 0,58 \frac{S^{0,365}}{n^{0,247}}; \quad (17)$$

– при длине 90 мм:

$$Ra = 2,96 \frac{S^{0,533}}{n^{0,372}}. \quad (18)$$

Таким образом, по полученным зависимостям модели, частоты вращения, подачи и глубины резания определены значения отклонения диаметра, шероховатости поверхностей при любом сочетании значений факторов.

Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении частоты вращения и уменьшения подачи отклонение диаметра отверстия и шероховатость поверхности уменьшаются.

При обработке отверстий резцовой сборной развёрткой с жёстким креплением безвершинных зубьев глубина резания в выбранном интервале на отклонение диаметра и шероховатость существенного влияния не оказывает, о чем свидетельствуют полученные результаты экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.А. Рогов, Г.Г. Позняк. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 288 с.
2. Дудак Н.С. Методика планирования экспериментальных исследований при обработке новыми стержневыми инструментами / Н.С. Дудак, Г.Т. Итыбаева, Ж.К. Мусина и др. // Вестник ПГУ. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2007. – № 4. – С. 154–163.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. –

- Т. 2. – 944 с.
4. Таскарина А.Ж. Планирование экспериментальных исследований обработки отверстий сборной резцовой головкой / А.Ж. Таскарина, Т.М. Мендебаев, Н.С. Дудак и др. // Сб. тез. междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии, оборудование и материалы в машиностроении». – Алматы: КазНТУ, 2012. – С. 152–156.
 5. Видмаер А.Э. Применение теории планирования эксперимента при испытаниях деталей машин: Метод. указания для выполнения УИРС по дисциплине «Детали машин» / А.Э. Видмаер, А.Н. Сорокин, В.А. Дахно. – Алма-Ата: РУМК, 1987. – 23 с.
 6. Дудак Н.С. Экспериментальные исследования обработки отверстий / Н.С. Дудак, Г.Т. Итыбаева, Ж.К. Мусина и др. // Междунар. науч. конф. молодых ученых, студентов и школьников «IX Сатпаевские чтения». – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2009. – Т. 4. – С. 16–20.
 7. Кокарев В.И. Применение статистических методов планирования эксперимента при идентификации процесса резания. – Алма-Ата: Kitap, 1985. – 52 с.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 20.01.15

А.И. Такуадина

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана

ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ МОДЕЛЕЙ В ФАРМАКОКИНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В статье рассмотрено понятие идентифицируемости фармакокинетических моделей. Приведены методы применения для линейных и нелинейных моделей. Рассмотрены различные подходы к анализу идентифицируемости модели. Проведен анализ идентифицируемости параметров для динамических систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Мақалада фармакокинетикалық үлгілерді сәйкестендіру тұжырымдамасы қарастырылған. Сызықты және сызықты емес үлгілерге қолдану әдістері келтірілген. Модельдік сәйкестікті талдаудың әртүрлі тәсілдері қарастырылады. Қарапайым дифференциалдық теңдеулердің динамикалық жүйелеріне арналған параметрлердің сәйкестендірілуі талданған.

The concept of identifiability of pharmacokinetic models is considered in the article. Methods of application for linear and nonlinear models are given. Different approaches to the analysis of model identifiability are considered. Analysis of the identifiability of parameters for dynamical systems of ordinary differential equations.

Ключевые слова: фармакокинетика, математическая, модель, идентифицируемость, уравнения.

При изучении математических моделей по описанию процесса распределения концентрации препаратов в камерах фармакокинетическое моделирование сводится к необходимости решения прямой или обратной задачи систем дифференциальных уравнений. Подробно о разновидностях фармакокинетических моделей было рассмотрено в статье [1]. Надо отметить тот момент, что в фармакокинетике при камерном подходе к анализу данных принято выделять в качестве единиц системы камеры (или компартменты). Камера может не иметь никаких пространственных ограничений в анатомическом смысле и необязательно должна совпадать с определенным органом. Фармакокинетическая камера при этом – это часть организма, в которой равномерно распределен препарат. Для целей фармакокинетического моделирования выделяется такое число камер, которое необходимо в данном случае для адекватного модельного описания имеющихся опытных данных. Тогда проблема идентифицируемости параметров математической модели становится актуальной. Действительно, невозможно построить исследование в фармакокинетике таким образом, чтобы измерять все переменные модели, описывающей поведение препарата.

Идентифицируемость параметров определяется разными авторами по-разному. Наиболее подходящие для понимания данной проблемы приведены ниже.

Определение. Свойство структурности подразумевает выполнение его практически во всем пространстве параметров ("практически во всем" означает возможное наличие особых случаев). Таким образом, параметр является структурно идентифицируемым (глобально или локально), если практически для всех значений вектора параметров соответствующие наблюдения определяют единственное значение или конечное множество значений данного параметра.

В случае фармакокинетических моделей важными являются также следующие определения.

Определение. Если для данной модели и эксперимента параметр является неидентифицируемым, но присвоение значений одному или более других параметров (т.е. перевод их из множества неизвестных параметров в множество фиксированных значений модели) делает его идентифицируемым, такой параметр называется условно идентифицируемым.

Определение. Даже если имеющиеся данные не позволяют однозначно определить какой-то параметр, приняв во внимание различные ограничения и дополнительную информацию, можно обычно оценить границы интервала возможных значений этого параметра. Данный подход к проблеме рассмотрен в работе Berman M., Schoenfield R. «Invariants in Experimental Data on Linear Kinetics and the Formulation of Models». Такой параметр называется интервально-или квазиидентифицируемым. Если такие интервалы достаточно малы, такие оценки этих параметров могут использоваться в практических целях.

Большое количество публикаций, например такие как работы Левакова А.А. «Идентификация нелинейных систем», Щербака В.Ф. «Условия идентифицируемости динамических систем», Audoly S., D'Angio L. «On the Identifiability of Linear Compartmental System: a Revisited Transfer Function Approach Based on Topological Properties» и многие другие не одно десятилетие в области математического моделирования были посвящены проблеме идентифицируемости математических моделей. Некоторые из предложенных методов применимы для линейных моделей, например метод анализа передаточной функции преобразования Лапласа, впервые введенный авторами Bellman R., Astrom K.J. «On Structural Identifiability», методы, основанные на топологическом анализе графа связности исследуемой системы (Anderson S., Hauck W.W. "Consideration of Individual Bioequivalence"), методы параметризации исследуемой системы и изучение свойств соответствующих отображений (Grewal M.S., Glover K. «Identifiability of Linear and Nonlinear Dynamical Systems»).

Говоря о нелинейности модели, подразумевается не только нелинейность по параметрам (non-LP).

Определение. Модель является нелинейной по параметрам θ (non-LP), если для ее выходов $Y(\theta, U, t)$ не выполняется принцип суперпозиции по параметрам, т.е. если существуют два скаляра μ и λ , два вектора параметров θ_1 и θ_2 и некоторый момент времени t , такие, что

$$Y(\theta, \lambda\theta_1 + \mu\theta_2, t) \neq \lambda Y(\theta_1, U, t) + \mu Y(\theta_2, U, t). \quad (1)$$

Важным является и понятие нелинейности по входам модели.

Определение. Модель является нелинейной по входам U (non-LI), если для ее выходов $Y(\theta, U, t)$ не выполняется принцип суперпозиции по входам, т.е. если существуют два скаляра μ и λ , две входные функции $U_1(\cdot)$ и $U_2(\cdot)$ и некоторый момент времени t , такие, что

$$Y(\theta, \lambda U_1 + \mu U_2, t) \neq \lambda Y(\theta, U_1, t) + \mu Y(\theta, U_2, t). \quad (2)$$

Рассмотрев различные подходы и методы, можно сказать, что в основном модели фармакокинетики являются нелинейными по параметрам, а линейность или нелинейность по входам зависит обычно от препарата, поведение которого моделируется. Таким образом, говоря, что модель является линейной, мы будем иметь в виду, что моделируемые с ее помощью процессы абсорбции, распределения и выведения препарата могут быть

рассмотрены в данном случае как процессы первого порядка.

В фармакокинетике нелинейность по входам называется дозозависимым поведением препарата. Проводятся специальные фармакокинетические исследования для установления зависимости доза-концентрация препарата. При этом считается, что с возрастанием дозы площадь под фармакокинетической кривой концентрация-время должна пропорционально увеличиваться. Если это условие выполняется, это облегчает задачу прогнозирования уровня концентрации препарата в крови при изменении режима дозирования. Обычно для проверки этого условия проводятся исследования с мультиперекрестным планом, в которых каждый из включенных здоровых добровольцев получает каждую из изучаемых доз препарата (минимальное число таких доз равно двум). Последующий анализ обычно основан на регрессионных соотношениях. Так, если пропорциональность между площадью под кривой (AUC) и соответствующей дозой (D) существует, регрессионная линия в координатах AUC-D должна проходить через начало координат. Ясно, что нулевая доза должна создавать нулевую концентрацию и соответственно нулевое значение AUC. Поэтому, проведя через имеющиеся точки в координатах AUC-D регрессионную прямую, нужно проверить гипотезу о равенстве нулю свободного члена. Другой метод предполагает построение регрессионной модели, проходящей через начало координат и состоящей из линейного и квадратичного члена зависимости от дозы $Y = a \cdot D + b \cdot D^2$, и последующую проверку статистической гипотезы о равенстве нулю коэффициента b. Еще один вариант регрессионной модели для проверки такой пропорциональности был предложен в работе Ezzet F., Spiegelhalter D.J. «Pharmacokinetic Dose Proportionality: Practical Issues on Design, Sample Size and Analysis». При этом предлагался следующий вариант описания зависимости площади под кривой, полученной у i-субъекта после получения j-дозы (D_j) препарата:

$$AUC_{ij} = \alpha \cdot (D_j)^\beta \cdot \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где ε - случайная ошибка модели, обычно предполагается, что $\log(\varepsilon)$ имеет нормальное распределение.

Если пропорциональность имеет место, коэффициент β должен быть равен единице. Для проверки этого условия применяют логарифмическое преобразование данных, приводящее к линейной регрессии:

$$\log AUC_{ij} = \log \alpha + \log D_j + \log(\varepsilon_{ij}). \quad (4)$$

С помощью регрессионного анализа проверяется статистическая гипотеза о значении коэффициента β . Что касается планирования исследований для проверки такой гипотезы, считается, что если пропорциональная зависимость от дозы выявляется для двух экстремальных доз, близких к верхней и нижней границам терапевтического коридора, то, скорее всего, это соотношение будет сохраняться и для всех остальных доз внутри терапевтического коридора. Поэтому теоретически для проверки выполнения условия пропорциональности достаточно двух доз, близких к верхней и нижней границам терапевтического коридора. Однако на практике измерения, проводимые на низких дозах препарата, имеют большую погрешность, что в свою очередь приводит к большим вариациям значений $\log(AUC)$. Поэтому реально для корректности модели требуются измерения по меньшей мере для 3 различных доз (Senn S. «Statistical Issues in Drug Development»). Применяемые при этом статистические процедуры подробно рассмотрены в работе [2].

Одним из подходов к анализу идентифицируемости нелинейных систем является линеаризация модели (математически - вокруг точки равновесия или физически - с помощью подходящего индикаторного эксперимента) и последующее применение методов, разработанных для линейных систем. Однако в этом случае надо иметь в виду, что многие неидентифицируемые линейные по входам LI компартментные модели (данные модели были рассмотрены в

предыдущей статье [1]) становятся идентифицируемыми, если любые линейные связи между камерами становятся нелинейными (Walter E., Pronzato L. «Qualitative and Quantitative Experiment Design for Phenomenological Models - A Survey»).

Другим возможным подходом является предложенный в работе Jacquez JA., Perry T. «Parameter Estimation: Local Identifiability of Parameters» метод и программа для проверки локальной идентифицируемости модели произвольной структуры в точке пространства параметров. При этом решение о локальной идентифицируемости параметра принимается на основе анализа матрицы $g'g$, где g - значение матрицы чувствительности модели в точке:

$$g = \begin{pmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial \theta_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial G_n}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial G_n}{\partial \theta_m} \end{pmatrix}.$$

При этом проверка локальной идентифицируемости в нескольких точках пространства параметров дает достаточно информации о идентифицируемости модели для практических целей. Достаточно сказать, что для камерных моделей с постоянными коэффициентами локальная идентифицируемость в одной точке означает локальную идентифицируемость практически во всем пространстве определяемых параметров, т.е. структурную локальную идентифицируемость.

Также следует обратить внимание на то, что близость или равенство нулю определителя матрицы $g'g$ означает потерю точности оценки параметров или невозможность их идентификации. Применение же современных оптимизационных программ для оценки неидентифицируемых параметров таких моделей может приводить к непредсказуемым результатам. Даже если в результате нескольких повторных расчетов с разными начальными приближениями было получено достаточно хорошее приближение измеренных и модельных кривых (значение суммарного квадрата отклонений достаточно мало), но при этом достаточно большое значение стандартного отклонения для одного или нескольких оцененных параметров, можно предположить, что данные параметры являются неидентифицируемыми или точность их оценок неудовлетворительна. Последнее возможно, если измерительной информации недостаточно или, другими словами, измерительный эксперимент не является оптимальным.

Анализ идентифицируемости параметров для динамических систем обыкновенных дифференциальных уравнений позволил ответить на вопрос, какие неизвестные параметры можно вычислить по известным данным на входе и выходе. В фармакокинетике в качестве данных на выходе обычно выступают результаты данных концентрации препарата в крови и/или моче. В качестве данных на входе используются данные о препарате (дозировка, способ введения, количество приемов лекарственного средства). Таким образом, можно дать более строгое определение понятия идентифицируемости.

Определение. Если параметры модели имеют единственное или конечное число значений, дающих величины входа-выхода данных, тогда будем говорить, что модель и ее параметры являются идентифицируемыми. Если же какое-нибудь подмножество параметров может принимать бесконечное количество значений, дающих те же самые данные входа-выхода, то данная модель и это множество параметров называется неидентифицируемой (идентифицируемая репараметризация).

Существуют разные подходы к поиску таких замен [3]. Например, с использованием рядов Тейлора [4], преобразованием подобия (M.J. Chappell, R.N. Gunn, «A procedure for generating locally identifiable reparametrisations of identifiable non-linear systems by the similarity transformation approach»), а также подходы, основанные на использовании методов дифференциальной алгебры [5]. Однако необходимо найти замену переменных,

наиболее подходящую именно для фармакокинетического моделирования. Таковой является рациональная репараметризация.

С другой стороны, можно ли заранее определить, будет ли данная модель идентифицируемой? Можно, используя фундаментальные математические подходы (высшую математику, теорию графов, математический анализ и т.д.). И более того, в случае неидентифицируемости модели в некоторых случаях удастся подобрать удобную замену переменных, приводящую исходную модель к идентифицируемой. В статье [3] описано, как можно считать наиболее оптимальный алгоритм, который по данной системе линейных дифференциальных уравнений определяет, является ли она идентифицируемой, а в случае неидентифицируемой модели выдает рациональную замену переменных, приводящую данную систему к идентифицируемой.

Еще один важный момент: физиологические системы являются обычно саморегулируемыми, то есть при отсутствии внешних воздействий они стремятся к установлению стационарного состояния. Но даже несмотря на это, измерительной информации часто оказывается недостаточно для идентификации неизвестных параметров выбранной модели. Кроме того, в моделях фармакокинетики существуют жесткие ограничения на входы, число и выбор наблюдаемых переменных модели, а также на число и частоту возможных измерений. Таким образом, если в результате проведенного анализа было установлено, что модель, выбранная для изучения поведения данного препарата, неидентифицируема по результатам эксперимента, могут быть использованы различные стратегии:

- изменение параметризации модели;
- введение в модель дополнительных ограничений и дополнительной априорной информации;
- изменение, если возможно, структуры самого эксперимента.

Итак, основной сложностью решения обратной задачи фармакокинетического моделирования являются ограниченные возможности получения измерительной информации для идентификации параметров модели. Особенность получения измерительной информации в фармакокинетических исследованиях приводят к необходимости решения таких задач, как выбор модели минимальной размерности, структура которой не противоречит имеющейся информации о фармакокинетике данного препарата, проверка структурной идентифицируемости выбранной модели, приведение ее к идентифицируемой, выбор оптимальной стратегии измерений, идентификация параметров модели по ограниченному числу измерений.

Список литературы:

1. Сагиндыков К.М. Математические модели по описанию процесса распределения концентрации препаратов в камерах / К.М. Сагиндыков, А.И. Такуадина // V междунар. науч.-практ. конф. - Астана, 2018. – С. 377-379.
2. Сергиенко В.И. Математическая статистика в клинических исследованиях / В.И. Сергиенко, И.Б. Бондарева. - М.: Гэотар Медицина, 2000.
3. Ильин А.И. Универсальный подход к решению обратной задачи фармакокинетики в случае произвольного количества камер / А.И. Ильин, С.И. Кабанихин, Д.А. Воронов. - Сиб. электрон. матем. изв., 2014. – Т. 11. – С. 41–49.
4. N.D. Evans, M.J. Chappell, "Extensions to a procedure for generating locally identifiable reparameterisation so fun identifiable systems", Math. Biosci., 168(2000), 137–159
5. N. Meshkat, M. Eisenberg, J.J. Distefano III, "An algorithm, for finding globally identifiable parameter combinations of nonlinear ODE models using Gröbner Bases", Math. Biosci., 222 (2009), 61–72.

Получено 13.08.2018

ӨОЖ 665.7.033.28:56.261(574)

П.Ә. Таңжарықов, Ұ.Ж. Сарабекова, Е.О. Дүйсенбеков

Қорқыт Ата атындағы Қызылорда мемлекеттік университеті, Қызылорда қ.

**АСФАЛЬТ-ШАЙЫРЛЫ ПАРАФИН ШӨГІНДІЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЖАЛПЫ МАҚСАТТАҒЫ ТЕХНИКАЛЫҚ
МАЙДЫ ДАЯРЛАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ**

В статье рассматриваются пути получения смазочных масел от вторичной утилизации твердых нефтяных отходов. Даются рекомендации в области применения полученных товаров. Планируется улучшить состояние окружающей среды за счет утилизации нефтяных отходов.

Мақалада қатты мұнай қалдықтарын екінші қайтара кәдеге жарату барысында одан жағармай алудың жолдары қарастырылған. Алынған өнімді қолдану салалары ұсынылады. Мұнай қалдықтарын кәдеге жарату арқылы қоршаған ортаның жағдайын сауықтыру көзделеді.

The article examines the ways of obtaining lubricating oils from secondary recycling of solid oil waste. Recommendations are given in the field of application of the received goods. It is planned to improve the state of the environment through the utilization of oil waste.

Кілт сөздер: асфальтты-шайырлы парафинді шөгінділер, май, технология, мұнай қалдығы, қайта кәдеге жарату.

Мұнай қалдықтарын қайта кәдеге жарату жүйесіндегі экологиялық қауіпсіздік мәселелерінің көтерілуі бүкіл әлем бойынша маңызды болып отыр. Ол әрбір мұнай өндіретін аймақтарда жиі байқалады.

Мұнай қалдықтары табиғи ортаның барлық компоненттеріне (жер бетіндегі және астындағы суларға, топырақ-өсімдік жамылғысына, биоортаға және атмосфералық ауаға) кері әсерін тигізеді. Мұнай қалдықтары қоршаған ортаға белгілі бір дәрежеде зиянды әсер етеді десек те, негізгі маңызды мәселе мұнай өңдеу жұмысының барлық кезеңінде мұнай қалдықтарын қайта өңдеу және пайдалану болып табылады.

Осы уақытқа дейін көптеген мұнай өндіруші кен орындарында түзілген мұнай шламдары мен қалдықтарын жою арнайы көму орындарында сақтау шаралары арқылы ғана жүзеге асырылып келеді. Бұл уақытша іс-шара болып табылады. Осы мәселелерді түбегейлі зерттеп, сараптай отырып, мұнай қалдықтарын қайта өңдеу арқылы тиімді пайдалану әдістерін қарастыруымыз қажет [1].

Бұл, біріншіден, қоршаған ортаға техногенді әсерді азайтады, екіншіден, қалдықтарды сақтауға төленетін төлем мөлшерін азайтады, үшіншіден, қайта өңдеуден алынған өнімді әрі қарай өндірісте, халық шаруашылығында қолданып пайда табуға мүмкіндік береді. Сондықтан мұнай қалдықтарын өңдеу және олардың түзілуін азайту экологиялық тұрғыдан қарағанда маңызды мәселе болып табылады және жаңа тәсілдер мен экологиялық-технологиялық шешімдерді талап етеді.

Зерттеу бағдарламасында әлемдік кәсіптік тәжірибеде қалдықтардың осы түрін пайдаға асыру бағыттары сарапталды және болашағы бар техникалық шешімдерді тиімді түрде жүзеге асыру шаралары қарастырылды.

Жергілікті мұнай кен орындарында жинақталып қалған асфальтты-шайырлы парафинді шөгінділерді (АШППШ) тиімді пайдаланудың белгілі әдістерін талдау негізінде жоғары сапалы жағармай өнімін алу үшін қолжетімді және арзан өндіріс қалдықтарына айналған парафин шөгінділерін шикізат ретінде қолдануға болатындығы зерттеулермен дәлелденген [1].

Бірақ ағымдағы көзқарастың өзгешелігі АШППШ негізіндегі көмірсутекті жағармай құрамынан қатты көмірсутектерді (парафиндер, петролатумдар, церезиндер) бөліп алуда емес, оның физика-химиялық құрамын қоспаларды пайдалану арқылы жақсарту болып табылады.

Көмірсутекті жағармайларды алу үшін қоюландырғыш ретінде қатты балкитын көмірсутектер: парафин, церезин, петролатум, озокерит, табиғи немесе синтетикалық парафиндер және т.б. қолданылады. Олардың құрамында тотыққан мұнай өнімдерін, полимерлі қоюландырғыштарын, тотықтыру ингибиторлары мен кейбір нейтралды толықтырғыштарды (күйе, графит және т.б.) кездестіруге болады.

Мақсатына және функционалдық сипаттамаларына қарай көмірсутекті жағармайларды, негізінен, консервациялық жағармай ретінде қолдану ұсынылады. Консервациялық жағармайларды 2 топқа бөлуге болады: жалпы мақсаттағы және темір арқанды (тросс).

Консервациялық жағармайларды - металл бұйымдарды, машиналар мен механизмдерді коррозиядан ұзақ және сенімді қорғауға және былғары бұйымдарды шіруден және құрғап кетуден сақтауда қолдануға болады.

Темір арқанды жағармайларды тау-кен ісінде және көтеру-тасымалдау қондырғыларында, темір органикалық өзекшелерді майлауға қолданады [2]. Көмірсутектер негізіндегі консервациялық және темір-арқанды жағармайлардың өнеркәсіптің кең таралған салаларындағы құрамдарына талдау жасалды (1-кесте).

1-кесте

Консервацияда тұрған және темір-арқанды майлардың құрамы

Жағар майлар	Стандарт	Құрамы	Қосымшалар, %
Қару-жарактық	МЕМСТ 19537-83	Петролатум (60-70%), М-11 майы (25-35%), 57 басқа церезиннің барлық түрі (3-5 %)	МНИ-7 (0,09-1,1 %)
Темір арқандық 39у	ТШ 38 УССР 2-01-33580	Қысқы нигрол (40%), майлы гудрон (25%), мұнайлы церезин (19%)	Триэтанолламин (1,2%)
Е-1 болат арқандарының органикалық өзекшелерін майлау үшін	МЕМСТ 15037-69	Қысқы нигрол мен мұнайлы церезиннің қоспасы 6,5:2,5	Мыс нафтенаты (20%), Күкірт (3%)
А, Б маркалы Торсиол-35	ТШ 38 УССР 2-01-21480	Өндірістік май И-20А (50%), Мұнайлы пластификатор (май ПН-6) (20%), церезин 80 (25%)	А Маркасы: қоңыр көмірлі (2%) және торфты (3%) жасушалар. Б Маркасы: қоңыр көмірлі жасушалар (4%), церезин 80, жаңартылған триэтанолламин (1%)

Сараптама бойынша жағармайлардың құрамы қоюландырғыштардың, қоспалар мен майлардың мөлшерлеріне байланысты ерекшеленетіндігі анықталды. Қару-жарак жағармайларында да қатты көмірсутектердің максималды мөлшері кездеседі (63-75%). Басқа құрамдарда оның мөлшері 23-35% аспайды. Жағармайлардағы майлардың мөлшері 25-35% (қару-жарактық), 70%-ға дейін (торсиол-35), ал қоспалардың массалық үлесі 1-5%-дан 19%-ға дейін өзгеріп отырады. Көрсетілген жағармайларда қоюландырғыш ретінде церезин мен петролатумды бірдей қолдануға болады.

Көмірсутекті жағармайлар гидрофобты, термиялық қайтымды және икемділіктің салыстырмалы төмен температуралық шегімен сипатталады. Көмірсутекті жағармайлар 40-80 °С-та тамшылай бастайды, максималды қолдану температурасы 50 °С, жоғары гидролиттік төзімділікке, тозуға қарсы жақсы қасиеттерге ие. Сондықтан суға

төзімділікке, химиялық және коллоидты тұрақтылыққа байланысты консервациялық майлар ретінде кең көлемде қолдануға мүмкіндігі мол. Кейбір көміртекті жағармайлардың физика-химиялық қасиеттері 2-кестеде келтірілген.

Көмірсутекті жағармайлардың табиғатына талдау жасай келе жағармайларды күрделі көп компонентті жүйе ретінде қарастырдық. Жағармайдың басты қасиеті құрамына байланысты екендігі анықталды [3, 4-6]. Көбінесе жағармайлар бұл 3 компонентті коллоидты жүйеден (сұйық негіз, яғни дисперсионды орта, қатты қоюландырғыш, қоспалар мен толықтырғыштардан) тұрады. Бірақ жағармайларды коллоидтық химия тұрғысынан бағалап және құрылым құрау процесін үйрену кезінде оларды 2 компонентті жүйеде, яғни дисперсионды ортадан және дисперсті фазадан тұратын етіп қарастырады.

Жағармайды қатты дене ретінде қарастыру оның құрылымына, табиғатына, мөлшеріне, бөлшектерінің формасына, дисперсті фаза және олардың арасындағы бөлшектердің энергетикалық байланысына қатысты. Сондықтан АШПШ қолдану арқылы көмірсутекті жағармайды жобалау үшін шөгінділердің өзара байланысын және әсерін, қатты көмірсутектер мен қоспалардың құрылымдық қалыптасуы мен жағармай қасиеттерінің қалыптасуындағы рөлін анықтау керек. Құрылымдарын анықтайтын факторларға оның химиялық құрамы, қасиеті және жағармайдың барлық компоненттер жүйесінің қатынасы, олардың әрекеттесу шарттары жатады (1-сурет).

Көмірсутекті жағармай алу үшін АШПШ-ның құрылымын және жағармайдың қалыптасу рөлін қарастыру керек. Жағармайлардың маңызды пайдалану қасиеттері қоюландырғыштың түріне, көптеген басқа да қасиеттері оның дисперстік ортасына байланысты екендігі белгілі.

Дисперстік фазаның қоюлану және құрылымдануына оның табиғаты, химиялық, топтық, фракциондық құрамы және дисперсионды ортасы айтарлықтай әсерін тигізеді. Әртүрлі кен орындарынан алынған көмірсутек құрамдары мұнайдың географиялық орналасуына қатысы жоқ екендігін көрсетті [7-8].

Шөгінділердің еру температурасы $54-80^{\circ}\text{C}$ аралығында болғандықтан, олардың құрамында парафиндерден бөлек жоғары температурада балқитын көмірсутектер және $75-80^{\circ}\text{C}$ балқитын церезин кездеседі.

Бірінші бөлік компоненттері молекулалық-дисперсті күйде, екіншісі коллоидты бөлшектер, үшіншісі үлкен, қатты бетінде шайырлы және басқа заттар адсорбцияланған ерімейтін формациялар, төртіншісі әртүрлі эмульгаторлармен тұрақтандырылған су мен мұнайдың эмульсиясы болып табылады.

АШПШ негізіндегі жағармайды дисперстік фазасына, ал екінші жағынан АШПШ-ның құрамындағы шайыр мен майдың көп мөлшерде болуына байланысты дисперстік ортаға – қатты көмірсутектермен қоюланған тұтқыр майға жатқызуға болады [7-8].

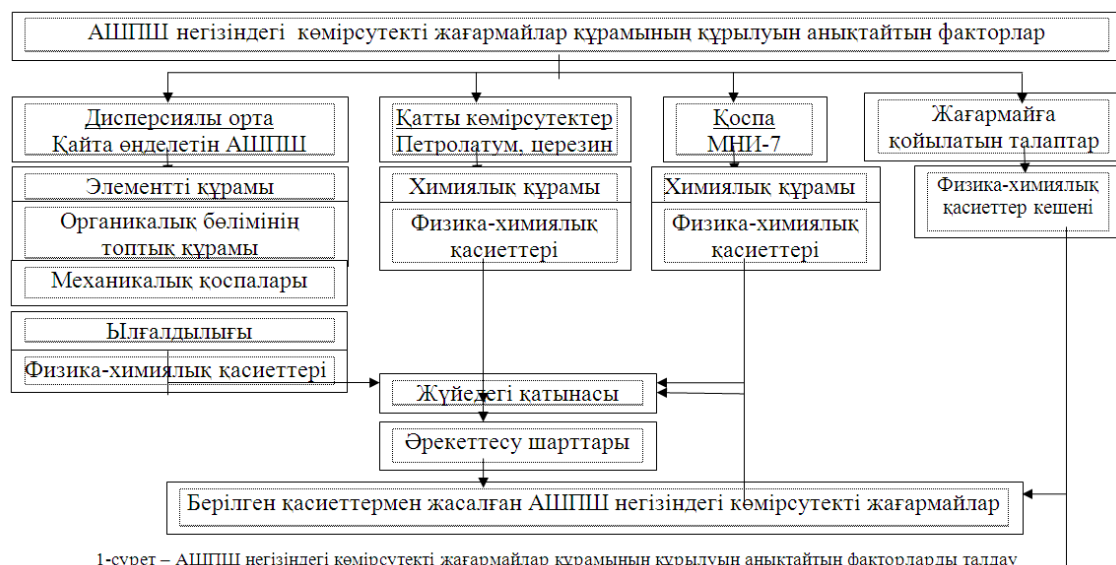
Көмірсутектердің негізгі топтары тауарлы майларға әртүрлі әсер ететіндігі белгілі болғандықтан, мұнайлы дистиллят алу кезеңінен тауарлы май алу кезеңіне дейінгі АШПШ-ның химиялық құрамын мұнай өнімдерімен салыстыру орынды.

Базалық майлардың химиялық құрамы табиғи мұнайдың ауыр бөлігімен анықталады. Себебі май алу процесінде мұнай көмірсутектерінің химиялық түрленуі болмайды, тек қана май алынатын көмірсутектер шоғырланады. Консервациядағы және темір арқанды майларды дайындауға пайдаланылатын АШПШ мен мұнай өнімдеріндегі көмірсутектердің құрамы мен құрылымы 3- кестеде келтірілген.

2-кесте

Көміртекті жағармайлардың физика-химиялық қасиеттері

Көрсеткіштер	Қару-жаратқы	Темір арқанды 39у	Е-1	Торсиол-35
1	2	3	4	5
Сыртқы түрі	Сары қоңыр түсті май	Қара түсті май	Қара түсті май	Қоңыр қара түсті май
Тамшылық температура °С, кем емес	60	65-80	40-55	65-80
Металдарға коррозиялық әсер	шыдамды	шыдамды	шыдамды	шыдамды
Коррозиялық әсерді бақылауда жасалған сынақ тәжірибедегі пластинаның материалы	мыс	болат	болат	болат
Судың мөлшері, %	жоқ	жоқ	жоқ	жоқ
Механикалық қоспалардың массалық үлесі, % артық емес	0,07	жоқ	жоқ	жоқ
1	2	3	4	5
Суда еритін қышқылдардың құрамы, %	Сәл қызғылт түске боялу	жоқ	жоқ	жоқ
Жылжу температурасы, °С, кем емес	50	—	—	—
Қышқылдық сан, 1 г майға, мг қышқыл	0,5-1,0	—	—	—
30 сағат бойы маркасы 40 немесе 50 болат пластиналарда 50 °С температурада қорғаныс қасиеттерін сынау	шыдамды			
Суыққа шыдамдылық температу- расы, °С кем емес		-25	-20	-35
Иненің ену тереңдігі, мм ¹	90-150	—	—	—
Тұтқырлық, Па*с: 0 °С	1500-4000	2000	800	250-360
20 °С	100-400	300-500	30	20-15
50 °С (100 с"1)	0,5-0,6	-	-	-
100 °С (мм'/с)	—	>32	40	>8,5
1 сағаттық булану, %, 100°С	-	0,5	1	0,8-1,5
150 °С	0	2,3	7	5-8
Салмақ, Н:	560-710	710	720	710
Пісіру қасиеттері	1410	1780	2240	1250-1780
Пайдаланудың температуралық шегі, °С	+50 дейін	-25тан +50 дейін	-20 дейін	-35тен +50 дейін
Ауыстырғыштар	Солидол С, ВТВ-1	Торсиол 35	—	Темір арқандық 39у
Консервациядағы қорғау уақыты, жылдар	5-10	5-10	5-10	3-5



3-кесте

Консервациялық майлар алынатын мұнай өнімдерінің сипаттамалары

Май, маркасы, стандарт (МЕМСТ, ТШ)	-ч ¹ Тұтқырлығы, мм /с		Ашық тигельдегі тұтану температурасы, °C (төмен емес)	Қату температурасы, °C (төмен емес)
	50 °C	100 °C		
1	2	3	4	5
Трансформаторлы, МЕМСТ 982-80 немесе МЕМСТ 10121-76	<9,6	2,5-3,5	150	-45
Ұршықты АУ, МЕМСТ 1642-75, немесе ТШ 38 101586-75	12-14	3,5-4,0	165	-45
И-20А, МЕМСТ 20799-75	17-23	4-6	180	-15
Цилиндрлі-11, ОСТ 38 0185-75	—	9-13	215	+5
Цилиндрлі-52, МЕМСТ 6411-76 немесе ТШ 38 10151-76	—	44-64	310	-5
М-11 (ДС-11)ТШ 38 101523-80	—	11±5	200	-15
Мұнайлы пластификатор ПН-6 (ПН- 6Ш), ОСТ-3801132-77	350450	30^0	230	-36
Трансмиссиялы май (нигрол), ТШ 38 101 539-75 қысқы	—	—	170	-20

АШПШ-дағы шайырлы-асфальтенді байланыстардың мөлшері тауарлы майлар мен майлы дистилляттарға қарағанда 3 - 4,5 есе көп. Ал күкіртті байланыстардың құрамы АШПШ-да (1,8%) майлы дистилляттар құрамынан (1,5-1,7%) азырақ, тауарлы майлардың құрамындағыдан (1,1-1,2%) 1,5 есе артық. Майлардың негізгі физика-химиялық және пайдалану қасиеттері, көрсетілген көмірсутектер топтары және олардың байланыстарының құрамы мен мөлшерлі қатынастарымен анықталады. Бұл қатынастар сақталмаған жағдайда майлардың пайдалану қасиеттері нашарлайды. Сондықтан АШПШ-ны тұтқыр май ретінде есептей келе, дисперсионды ортаның негізгі пайдалану қасиеттеріне көмірсутекті құрамының әсер етуін анықтау қажет.

Пайдаланылған әдебиеттер

1. Жұмағұлов Т.Ж. Өндіріс қалдықтарын тиімді пайдалану арқылы экологияны жақсарту / Т.Ж. Жұмағұлов, П.Ә. Таңжарықов, Б.Б. Абжалелов, М.М. Абжаев. – Қызылорда: Ақмешіт баспа үйі, 2015. – 250 б.
2. Ищук Ю.Л. Технология пластичных смазок. Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
3. Великовский Д.С. Консистентные смазки / Д.С. Великовский, В.Н. Поддубный, В.И. Вайншток др. - М.: Химия, 1966. – 264 с.
4. Сеницын В.В. Подбор и применение пластичных смазок. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1974. – 416 с.
5. Вайншток В.В. Состав и свойства пластичных смазок: Темат. обзор / В.В. Вайншток, И.Г. Фукс, Ю.Н. Шехтер и др. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1970. - 87 с.
6. Бисенов К.А. Эффективные методы приготовления производственных материалов из высокопарафинистых нефтяных отходов / К.А. Бисенов, П.А. Танжариков, У.Ж. Сарабекова // Современные тенденции в образовании и науке: Сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. - Ч. 10. – Тамбов, 2013. - С. 24-29.
7. Сарабекова У.Ж. Технология эффективного использования твердых нефтяных отходов / У.Ж. Сарабекова, П.А. Танжариков, И.Х. Байжан // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные научные исследования: Теория, методология, практика». – Молдавия, 2017. - С. 84-91.
8. Танжариков П.А. Органикалық мұнай шөгінділері негізінде өнеркәсіптік жақпа май алу технологиясы / П.А. Танжариков, Ұ.Ж. Сарабекова, А.Е. Ағыбаев // Материалы респуб. науч.-практ. конф. молодых ученых «Наука. Образование. Молодежь». –Алматы, 2017. - С. 17-18.

Получено 13.08.2018

МРНТИ 28.23.15

Д.А.Тусупов, Г.Б. Абдикеримова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

Ф.А. Мурзин

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, Россия

СЕГМЕНТАЦИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО НЕСТАНДАРТНОМУ ПОДХОДУ

В статье представлен анализ по нестандартному подходу сегментации текстурных областей на микрофотографиях в системах обработки изображений. Исследуется вопрос о применимости наборов текстурных признаков для анализа экспериментальных данных с целью выявить на микрофотографиях характерные участки, которые в будущем можно будет увязать с пористостью, химической реактивностью и т.д. Был осуществлен подбор подходящих алгоритмов и созданы соответствующие программные инструменты на Matlab и в программном пакете для статистического анализа Statistica.

Мақалада бейнелерді өңдеу жүйесі бойынша микросуреттердегі текстуралық облыстарды сегменттеуді стандартты емес тәсілмен талдау қарастырылған. Эксперименттік мәліметтерді талдау үшін текстуралық белгілер жиынтығының қолдану мүмкіндігі туралы мәселе микросуреттердегі маңызы бар облыстарға кеуекті, химиялық реакция және т.б. анықтау мақсатында зерттеледі. Тиісті алгоритмдер таңдалды, Matlab-да және статистикалық талдау үшін Statistica программалық пакеттерінде тиісті бағдарламалық жасақтама құралдары жасалды.

The article provides an analysis of the nonlinear segmentation of textured regions on microphotography in the processing of systems. Here are some questions about the use of experimental data from the experimental data collection on microphones, which can be supposed to be related to porosity, chemical reaction, and so on. It has been upgraded to suit the algorithms and provides appropriate software tools for Matlab and the statistical analysis of Statistica.

Ключевые слова: текстурные признаки, обработка изображений, анализ микрофотографий, электронная микроскопия, растительное сырье.

Основанием для проведения настоящей НИР является договор между Институтом химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН) и Институтом систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН (ИСИ СО РАН) № 16-13-10200/2 от 1 июля 2016 г. Работа проводится в целях исполнения ИХТТМ СО РАН Соглашения № 16-13-10200 от 12 мая 2016 года между Российским научным фондом, руководителем проекта и организацией о предоставлении гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований, касающегося предоставления гранта на выполнение научного проекта «Контролируемое изменение структуры и состава растительного сырья механохимическими методами для интенсификации экстракции биологически активных соединений» № 16-13-10200».

В данной работе основное внимание уделено сегментации по текстурным признакам по нестандартному подходу. Источником являются микрофотографии растительного сырья, размолотого на специальных мельницах. Цель программы состоит в том, чтобы проводить компьютерные эксперименты и накапливать количественные данные (значения текстурных признаков) для изображений клеточных стенок, обработанных при различной температуре. Конечная цель работы – определение по микрофотографии пористости, химической реактивности сырья и т.д.

Несмотря на повсеместное присутствие текстур в изображениях, единого и формального подхода к описанию текстуры и строгого её определения на данный момент не существует. Методы анализа текстур, как правило, разрабатываются для каждого отдельного случая.

В [1] под текстурой понимают «пространственную организацию элементов в пределах некоторого участка поверхности». Там же объясняется, что эта организация обусловлена определенным статистическим распределением интенсивности серых тонов или тонов различного цвета. Участок может считаться текстурным, если количество отмечаемых на нем перепадов интенсивности или изменений цвета достаточно велико. В [2] текстурой называют «некоторым образом организованный участок поверхности». В [3] текстура определяется как матрица или фрагмент пространственных свойств участков изображений с однородными статистическими характеристиками.

Из приведенных выше определений и характеристик следует, что текстура – это некоторый участок изображения, тот, который имеет однородные статистические характеристики. Это значит, что каждую текстуру данного класса можно описать с помощью характерного свойства, общего для всех текстур данного класса [1]. Такие свойства называют текстурными признаками. Текстурные признаки играют важную роль при разделении изображения на отдельные области. Рассмотрим более подробно систему признаков.

В рассматриваемой задаче исследуются серые (полутонные) изображения. Таким образом, изображение задается в виде матрицы, значениями которой являются значения яркости пикселей в интервале от 0 до 255.

Стандартный подход для вычисления текстурных признаков следующий. Необходимо выбрать так называемое бегущее окно с нечетной стороной: 3, 5, 7 пикселей. Признак вычисляется внутри бегущего окна. Размер локального фрагмента является носителем текстурных свойств. Значение признака записывается в новую матрицу того же размера, что и исходная. В новой матрице значение записывается в точку с координатами, равными координатам центра бегущего окна. Элементы новой матрицы получаются в некотором интервале (А, В). Далее обычно этот интервал линейно отображается в отрезок (0,255). После этого имеется возможность визуализировать результат вычисления текстурного признака.

Эксперименты показали, что стандартный подход в нашем случае мало информативен. Поэтому было решено использовать нестандартный подход. А именно, текстурные окна вычисляются по большим окнам (в том числе по неквадратным), которые пользователь может задавать, выбирая область, представляющую для него интерес. То есть речь идет о вычислении числовых характеристик, относящихся к обширным областям, включающих различного рода артефакты. Рассмотрены 18 наиболее важных текстурных признаков, и все они реализованы в программе.

Расчет текстурных признаков по выбранным сегментациям был реализован в среде MatLab, а анализ этих текстурных признаков в программном пакете для статистического анализа Statistica. Для решения данной задачи предложено большое число подходов и алгоритмов. Основные усилия были сосредоточены на создании эффективных алгоритмов вычисления текстурных признаков. Выделенные области были выбраны случайным образом. Для каждой области вычисляются текстурные признаки.

Энергия $T_1 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j)^2$.	$T_4 = \sum_{i=1}^L (i - T_5)^2 p_{+,+}(i)$.
Энтропия	Корреляция
$T_2 = -\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) \cdot \log_2(p(i, j))$.	$T_7 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j) \cdot p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j}$.
Гомогенность $T_3 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \frac{p(i, j)}{1 + |i - j|}$.	Дисперсия $T_8 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i - \mu_i)^2 p(i, j)$.
Контраст $T_4 = (i - j)^2 \cdot p(i, j)$.	Среднее по суммам $T_9 = \sum_{i=1}^L i \cdot p_{+,+}(i)$.
Энтропия по суммам	Информационные меры корреляции
$T_5 = -\sum_{i=1}^L p_{+,+}(i) \log(p_{+,+}(i))$.	(T_{10}, T_{11})
Дисперсия по суммам	$\frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \frac{p(i, j)}{j^2}}$
$T_{10} = \frac{T_2 - HXY_1}{\max(HX, HY)}$.	$T_{11} = \frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j)}$ - обратные моменты
$T_{11} = [1 - \exp(-2(HXY_2 - T_2))]^{1/2}$.	$\frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L j^2 p(i, j)}$
Разностная энтропия	$T_{12} = \frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j)}$ - моменты;
$T_{12} = -\sum_{i=1}^L p_{i,-}(i) \log(p_{i,-}(i))$.	$\frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (p(i, j))^2}$ - неоднородность яр-
k-й начальный момент	кости;
$T_{13}^k = n^{-2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j)]^k$.	$T_{17} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (\sum_{j=1}^{N_j} (p(i, j)))^2}{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} p(i, j)}$ - неоднород-
Где	ность длины серии;
$HX = -\sum_i p_i(i) \log(p_i(i))$,	$T_{18} = \frac{N \cdot N}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L j p(i, j)}$ - доля изображения
$HY = -\sum_j p_j(j) \log(p_j(j))$,	в сериях.
$HXY_1 = -\sum_i \sum_j p_i(i) \log(p_i(i) p_j(j))$,	
$HXY_2 = -\sum_i \sum_j p_i(i) p_j(j) \log(p_i(i) p_j(j))$,	
$p_i(i) = \sum_j p(i, j)$,	
$p_j(j) = \sum_i p(i, j)$,	
$p_{+,+}(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \delta_{+,+} p(i, j), \quad k = 2, 3, \dots, 2 \cdot 31$,	
$p_{-,-}(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \delta_{-,-} p(i, j), \quad k = 0, 1, \dots, 30$,	
$\delta_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{если } m = n \\ 0, & \text{если } m \neq n. \end{cases}$	

После проверки каждого признака на информативность было выбрано из 18 признаков 5 текстурных признаков: $T_2, T_9, T_5, T_{14}, T_{15}$. Анализируемые области на исходном изображении представлены на рис. 1. Значения текстурных признаков выделенных областей представлены в табл. 1.

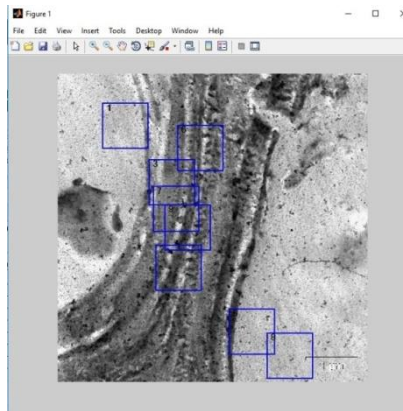


Рисунок 1 - Анализируемые области на исходном изображении

Таблица 1

Значения текстурных признаков выделенных областей

number of the selected fragment	opt	sum_entr	sum_avr	entropy	obratnyi
1	38,667	2,517689	12,30118	2,731891	0,029274
2	14,99576	2,923521	7,353998	3,10399	0,111732
3	19,54998	2,839083	8,551063	3,019918	0,072812
5	32,33043	2,841538	11,01414	3,07617	0,054194
6	17,32884	2,849357	7,989712	3,02184	0,083256
7	17,01542	2,799129	7,951417	2,97708	0,087836
8	38,52285	2,143402	12,32257	2,391618	0,031044
9	15,48823	2,88239	7,509812	3,055145	0,106009

Наиболее важным результатом, получаемым в результате древовидной кластеризации, является иерархическое дерево. Метод Варда отличается от всех других методов, поскольку он фактически использует методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами. Метод минимизирует некоторую сумму квадратов расстояний. Более точно в качестве расстояния между кластерами берется прирост суммы квадратов расстояний объектов до центров кластеров, получаемый в результате их объединения. В целом метод представляется очень эффективным, однако он стремится создавать кластеры малого размера.

Каждый узел диаграммы (рис. 2) представляет объединение двух или более кластеров, положение узлов на горизонтальной оси определяет расстояние, на котором были объединены соответствующие кластеры [4].

В табл. 2 приведены результаты дендограммы в числовом виде.

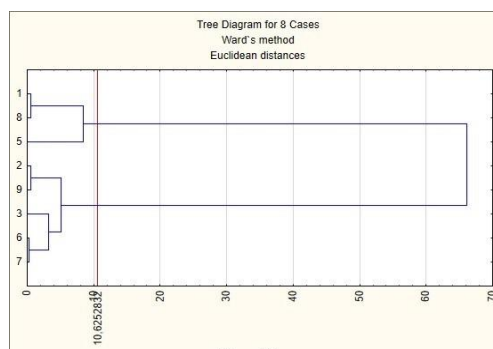


Рисунок 2 - Дендограмма для 5 текстурных признаков: метод Варда, Евклидово расстояние

Таблица 2

Результат древовидной кластеризации

Cluster Membership (11_шаблон) Linkage distance = 10,6253 Ward's method Euclidean distances	
	Cluster Membership
2	1
3	1
6	1
7	1
9	1
1	2
5	2
8	2

Графика Graph of means позволяет просмотреть средние значения для каждого кластера на линейном графике (рис. 3, табл. 3).

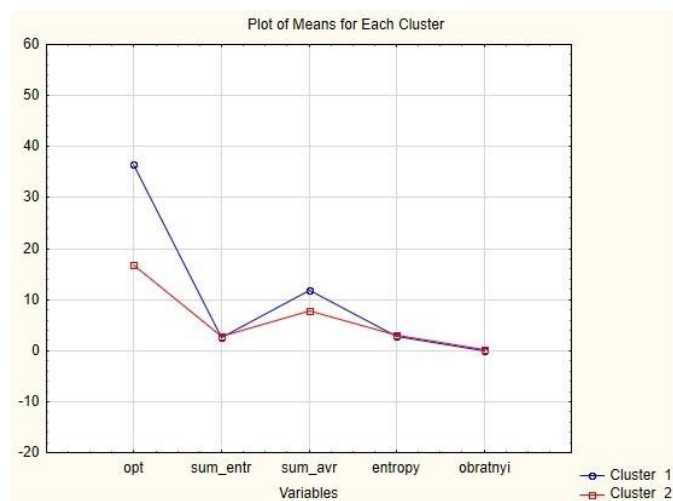


Рисунок 3 - Среднее значение текстурных признаков для каждого кластера

Таблица 3

Среднее значение, среднеквадратичное отклонение и дисперсия текстовых признаков

Variable	Descriptive Statistics for Cluster 2 (11_шаб		
	Mean	Standard (Deviation)	Variance
opt	16,87564	1,791359	3,208968
sum_entr	2,85870	0,046861	0,002196
sum_avr	7,87120	0,469253	0,220198
entropy	3,03559	0,047221	0,002230
obratnyi	0,09233	0,016179	0,000262

По средним значениям текстовых признаков из табл. 3 мы можем сказать, что они не пересекаются, отдалены друг от друга хорошо. Такое расположение координат центров кластеров говорит о хорошем качестве кластеризации.

Для двух кластеров результаты дисперсионного анализа говорят о хорошем качестве кластеризации: уровень значимости p везде меньше 5% (табл. 4).

Таблица 4

Результат дисперсионного анализа

Variable	Analysis of Variance (11_шаблон)					
	Between (SS)	df	Within (SS)	df	F	signif. (p)
opt	722,5888	1	39,00883	6	111,1424	0,000043
sum_entr	0,2401	1	0,25291	6	5,6954	0,054285
sum_avr	30,1216	1	2,00377	6	90,1950	0,000078
entropy	0,1714	1	0,24323	6	4,2287	0,085482
obratnyi	0,0055	1	0,00143	6	23,0152	0,003009

Исходя из визуального представления результатов и по евклидовому расстоянию, мы можем определить состав каждого кластера (табл. 5).

Таблица 5

Кластеры, к которым принадлежат наблюдение, евклидовы расстояния и номер наблюдения

	11_шаблон		
	CASE_NO	CLUSTER	DISTANCE
1	1	1	0,98
5	4	1	1,92
8	7	1	0,95
2	2	2	0,87
3	3	2	1,23
6	5	2	0,21
7	6	2	0,08
9	8	2	0,64

Состав кластеров, выделенных методами Варда и k-means, представлен в табл. 6.

Таблица 6

Состав классов, выделенных методами Варда и k-means

Номер класса	Количество объектов в классе	Состав класса
1	3	1, 5 и 8 выделенные области
2	5	2, 3, 6, 7 и 9 выделенные области

В заключение можно сказать следующее.

Работа посвящена исследованию текстурных изображений и сегментации по текстурным признакам. Источником являются микрофотографии растительного сырья, размолотого на специальных мельницах. Работа выполнена для Института химии твердого тела и механохимии СО РАН. В работе идет речь о вычислении разного рода текстурных признаков и других характеристик изображений. Был проанализирован большой набор методов исследования текстур и из рассмотренных методов были выбраны наиболее информативные [5, 6]. В итоге была разработана программа для вычисления различных текстурных признаков. Всего производился расчет 18 текстурных признаков. Результаты расчетов можно сохранять. Основная цель работы – создание программных инструментов. В итоге был проведен эксперимент в нестандартном варианте. Проведя исследование над текстурными признаками, было отобрано пять признаков, такие как $T_2, T_9, T_5, T_{14}, T_{15}$, по которым мы провели сегментацию по областям. Используя методы *k-means* и агломеративный, признаки хорошо выделили области на изображениях. Результаты показывают, что эти признаки являются информативными.

Список литературы

1. Андреев Г.А. Анализ и синтез случайных пространственных текстур / Г.А. Андреев, О.В. Базарский, А.С. Глауберман и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 3-33.
2. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67. – № 5. – С. 98-119.
3. Потапов А.А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малококонтрастных целей // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – № 9. – С. 1101–1119.
4. V. S. Sidorova. Hierarchical Cluster Algorithm for Remote Sensing Data of Earth. // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2012. - Vol. 22, No. 2. - P. 373–379.
5. Пластинин А.И. Метод формирования признаков текстурных изображений на основе марковских моделей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.17 / А.И. Пластинин. – Самара, 2012. – 20 с.
6. Мин И.В. Сегментация изображений на основе выделения текстурных и цветовых признаков / И.В. Мин // Материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. "Современные техника и технологии". – Томск: ТПУ, 2012. – С. 290-292.
7. Карманов А.П. Лигнин. Структурная организация и самоорганизация // Ин-т химии Коми науч. центра Уральского отделения РАН. - Сыктывкар, 1999. – С. 66-67.
8. Карманов А.П. Проблемы химии древесины и лесохимии / А.П. Карманов, Д.В. Матвеев // Ин-т химии Коми науч. центра Уральского отделения РАН. - Сыктывкар, 2001. – С. 50-52.

Получено 13.08.2018

УДК 669

А.М. Халелов, Н.А. КуленоваВосточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск**ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИОБИЯ ИЗ ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

В статье представлены данные по повышению содержания оксида ниобия в титановом шлаке и дальнейшее распределение ниобия в процессе получения тетрахлорида титана. Распределение ниобия и изменение температурного режима работы хлорирующей установки позволяет улавливать элементы ниобия из парогазовой смеси непосредственно при выходе из хлоратора, то есть в начале процесса конденсации тетрахлорида титана. Вывод соединений ниобия через пылеосадительную камеру с солевой ванной обеспечит получение промежуточного продукта с высоким содержанием оксида ниобия, который может быть направлен на производство ниобия.

Мақалада титан қожындағы ниобий оксиді мөлшерінің жоғарылауы және титан тетрахлоридін алу үдерісі бойынша мәліметтер берілген. Ниобийдің бөлінуі мен хлорлау қондырғысы жұмысының температуралық режимінің өзгеруі хлоратордан шығу кезінде тікелей булы газды қоспадан, яғни титан тетрахлоридінің конденсация үдерісінің басында ниобий элементтерін ұстауға мүмкіндік береді. Тұздық былаудан шаңтұндыру камерасы арқылы ниобий қосылыстарының шығымы ниобий өндірісіне жіберуге болатын ниобий оксидінің жоғары мөлшері бар аралық өнімді алуды қамтамасыз етеді.

The article presents data regarding increasing of niobium oxide content in titanium slag and further distribution of niobium during the process of titanium tetrachloride synthesis. Niobium distribution and change of operation temperature of chlorinating unit allows for trapping niobium elements from vapor-gas mixture immediately after its escape from chlorinator, i.e. at the beginning of titanium tetrachloride condensation process. Extracting niobium compounds through dust precipitation chamber allows getting intermediate product with high content of niobium oxide that can be directed for production of niobium.

Ключевые слова: титановый шлак, оксид ниобия, тетрахлорид титана, оксохлорид ниобия, хлорирующая установка, парогазовая смесь, пульпа.

Повышение комплексности переработки сырья и снижение себестоимости продукции является основой для дальнейшего развития предприятий горно-металлургической отрасли Республики Казахстан.

В титановом производстве имеются еще значительные резервы повышения комплексности использования исходного сырья, заключающиеся не только в извлечении остальных металлов-спутников, но и соединений этих металлов. В связи с этим технология попутного извлечения соединений ниобия из промпродуктов титанового производства представляет большой практический интерес и является актуальной.

Производство губчатого титана в производственных масштабах осуществляется методом магнийтермического восстановления тетрахлорида титана. На качество губчатого титана непосредственно влияют примеси, которые находятся в очищенном тетрахлориде титана [1].

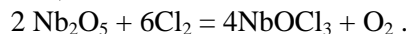
Процесс производства тетрахлорида титана довольно сложный технологически и осуществляется в два этапа. На первом этапе титановый шлак хлорируют и получают технический тетрахлорид титана. На втором этапе технический тетрахлорид титана очищают методом ректификации. Основные примеси, которые содержатся в большом количестве в тетрахлориде титана, переходят непосредственно из титанового шлака в процессе хлорирования [2]. В дальнейшем для получения очищенного тетрахлорида титана необходимо максимально эффективно провести процесс хлорирования титанового шлака.

В последнее время намечается тенденция увеличения содержания оксида ниобия в титановом шлаке, что обусловлено его высоким содержанием в разрабатываемых месторождениях титана. В процессе добычи и обогащения титаносодержащего сырья, а также в дальнейшем при проведении рудно-термической плавки титановых концентратов, основная часть оксида ниобия переходит в титановый шлак. Таким образом, примесь как оксид

ниобия на этих переделах невозможно технологически сконцентрировать и извлечь из основного потока производства.

В последнее время на примере производства технического тетрахлорида титана АО «Усть-Каменогорский титано-магний комбинат» в пульпе TiCl_4 хлорирующих установок наблюдалось повышение содержания соединений ниобия. Ниобий в пульпе TiCl_4 хлорирующих установок находится в виде NbOCl_3 , который является твердым веществом с температурой возгонки 335°C .

В процессе хлорирования титаносодержащего сырья оксид ниобия хлорируется при температуре более 700°C по реакции



Имея низкую температуру сублимации (335°C), NbOCl_3 мало улавливается расплавом хлоратора и твердыми хлоридами (возгонами) пылевой камеры хлорирующей установки. Комплексная соль $\text{KCl} \cdot \text{NbOCl}_3$ разлагается при температуре $420-425^\circ\text{C}$. Поэтому оксохлорид ниобия при температуре парогазовой смеси $450-480^\circ\text{C}$ в пылевую камеру приходит в виде паров, проходит пылевую камеру, конденсируется в оросительном скруббере хлорирующей установки и накапливается в танке пульпы оросительного скруббера. Часть NbOCl_3 поступает в оросительный конденсатор, из него в баки-сборники технического TiCl_4 - продукцию хлорирующей установки. Оксохлорид ниобия – токопроводящее вещество, и, поступая в кубы ректификационной колонны с техническим TiCl_4 , выводит из строя открытые нагреватели кубов колонны.

В 2016-2017 гг. в цех по производству тетрахлорида титана поступало титаносодержащее сырье - собственное и стороннее. Среднее содержание Nb_2O_5 в нем представлено в табл. 1.

Таблица 1

Среднее содержание оксида ниобия в титаносодержащем сырье

Титановый шлак	Содержание Nb_2O_5		Рост содержания Nb_2O_5 в 2017 г. по сравнению с 2016 г., %
	2016 г.	2017 г.	
Сторонний	0,074	0,1224	165,40
Собственного производства	0,06	0,07725	128,75

В 2017 году по сравнению с 2016 годом содержание оксида ниобия в титаносодержащем сырье возросло:

- в стороннем шлаке – на 65,4%;
- в шлаке собственного производства – на 28,75%.

В соответствии с ростом содержания Nb_2O_5 в сырье повысилось содержание ниобия и в пульпе оросительного скруббера хлораторов (табл. 2). Для удобства обработки результатов исследований содержание ниобия в продуктах хлорирования титановых шлаков принято приводить в пересчете на Nb_2O_5 .

Таблица 2

Среднее содержание ниобия в пульпе оросительного скруббера

Наименование продукта	Содержание Nb_2O_5		Рост содержания Nb_2O_5 в 2017 г. по содержанию с 2016 г., %
	2016 г.	2017 г.	
Пульпа оросительного скруббера	5,67	8,30	146,38

Как видно из данных табл. 2, в 2017 году по сравнению с 2016 годом содержание ниобия в пульпе оросительного скруббера возросло на 46,38%.

С целью дальнейшего извлечения оксида ниобия при производстве тетрахлорида титана необходимо было изучить распределение оксида ниобия детально на каждом аппарате хлорирующей установки. В процессе хлорирования титанового шлака оксид ниобия хлорируется при температуре более 700 °С, переходит в пары окситрихлорида ниобия, конденсируется в оросительном скруббере хлорирующей установки и накапливается в танке пульпы оросительного скруббера. Часть окситрихлорида ниобия поступает в оросительный конденсатор, из него в баки-сборники технического тетрахлорида титана. Окситрихлорид ниобия, накапливаясь в танке пульпы оросительного скруббера хлорирующей установки, сгущает пульпу до плотной желеобразной массы, тем самым снижая эффективность работы самого скруббера. В кубах ректификационной колонны окситрихлорид ниобия, поступивший с техническим тетрахлоридом титан, выводит из строя их открытые нагреватели.

Изучение распределения элементов ниобия позволяет выявить проблемные участки при производстве технического тетрахлорида титана, а также понять, где технически правильно сконцентрировать элементы ниобия и извлечь их из производства. Извлечение элементов ниобия при производстве тетрахлорида титана позволяет повысить эффективность работы оборудования хлорирующей установки, а также получить более качественный технический тетрахлорид титана. Получение качественного технического тетрахлорида титана позволит более эффективно вести процесс дальнейшей очистки от других примесей.

Наиболее приемлемым для извлечения ниобия без установки дополнительного оборудования и затрат предлагается изменение температурного режима работы системы конденсации хлорирующих установок. Для эффективной работы всех ее необходимо максимально улавливать элементы ниобия из парогазовой смеси непосредственно при выходе из хлоратора, то есть в начале процесса конденсации тетрахлорида титана. Для чего отработаны различные температурные режимы работы пылеосадительной камеры с солевой ванной, позволяющие улавливать пары окситрихлорида ниобия и конденсировать их, что позволяет вывести из процесса элементы ниобия и более эффективно вести процесс конденсации тетрахлорида титана.

При отработке различных температурных режимов работы пылеосадительной камеры с солевой ванной выбран наиболее оптимальный режим работы, позволяющий максимально улавливать соединения ниобия. Он был подобран для всей системы конденсации хлорирующей установки и повысил степень извлечения и конденсации тетрахлорида титана.

Вывод соединений ниобия через пылеосадительную камеру позволяет получить промежуточный продукт с высоким содержанием ниобия, который может быть направлен на его производство. Получение нового промежуточного продукта с таким ценным компонентом, как ниобий, позволит снизить накладные расходы на производство технического тетрахлорида титана.

Таким образом, исследование способа извлечения ниобия из титаносодержащего сырья позволило повысить качество тетрахлорида титана при хлорировании титанового шлака и обеспечить комплексную переработку сырья.

Список литературы

1. Сергеев В.В. Металлургия титана / В.В. Сергеев, А.Б. Безукладников. – М.: Металлургия, 1979. – 263 с.
2. Худайбергенов Т.Е. Титаномagneйное производство. – Алматы.: ГИ им. Кунаева, 1996. - 177 с.

Получено 13.08.2018