

Д. М. Кузнецов (д.т.н., проф.)¹, Н. Г. Сундукова (асп.)¹,
А. В. Ганцев (к.т.н., доц.)², В. О. Кучкина (асп.)²

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
кафедра «Экология и промышленная безопасность»

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; e-mail: kuznetsovdm@mail.ru

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, кафедра «Технология нефти и газа»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: leria_02@mail.ru

D. M. Kuznetsov¹, N. G. Sundukova¹, A. V. Gantsev², V. O. Kuchkina²

STATISTICAL STUDIES OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF GRAPHITIZED CARBON MATERIALS

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

132, Prosveshcheniya Str., 346428, Novocherkassk, Russia; e-mail: kuznetsovdm@mail.ru

² Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; email: leria_02@mail.ru

Представлены результаты статистических исследований графитированных электродов, полученных на основе игольчатого кокса фирмы «Nichimen», физическими методами. Изучена совокупность физических величин, характеризующих структуру графитированного электрода: плотность, скорость ультразвуковых волн, модуль Юнга, удельное электрическое сопротивление, термический коэффициент линейного расширения. Установлено, что распределение термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) по выборке из 112 графитированных образцов имеет стандартный гауссовый колоколообразный вид. Действующая технология изготовления графитированных электродов не позволяет получать материал с достаточно жестким ограничением среднеквадратичного отклонения ТКЛР менее $2.7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, измеренные значения ТКЛР не могут использоваться напрямую для расчета термонапряженного состояния сочленения графит-ниппель.

Ключевые слова: графитированный электрод; модуль Юнга; плотность; скорость ультразвуковых волн; термический коэффициент линейного расширения; удельное электрическое сопротивление

The article presents experimental results of statistical studies of graphitized electrodes obtained on the basis of Nichimen needle coke by physical methods. A set of physical quantities characterizing the structure of a graphitized electrode has been studied: density, ultrasonic wave velocity, Young's modulus, electrical resistivity, thermal coefficient of linear expansion. It is established that the distribution of the temperature coefficient of linear expansion over a sample of 112 graphitized samples has a standard Gaussian bell-shaped appearance. The current technology of manufacturing graphite electrodes does not allow to obtain a material with a sufficiently strict limitation of the RMS deviation of the parameter value of the temperature coefficient of linear expansion less than $2.7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, the measured values of the temperature coefficient of linear expansion cannot be used directly to calculate the thermally stressed state of the graphite nipple joint.

Key words: density; electrical resistivity; graphitized electrode; thermal coefficient of linear expansion; velocity of ultrasonic waves; Young's modulus

Совершенствование технологии производства искусственного графита для электрометаллургии требует повышенного внимания к особенностям технологического процесса. Углеродсодержащие материалы занимают ведущее место в производстве электродов^{1, 2}, их применяют в качестве анодов литиевых источников тока^{3, 4}, для электровосстановления CO_2 ⁵. Игольчатый кокс относится к высококачественным видам сырья для получения современных функциональных углеродных материалов^{6, 7}. Использование его в качестве наполнителя для увеличения термической прочности часто приводит к необходимости корректировки технологического процесса⁸. В этом направлении проводятся фундаментальные исследования физических свойств графитированной продукции^{9–11}.

Управление эксплуатационными характеристиками электродов возможно на основе получения комплексной информации об их физических свойствах и структурных особенностях: плотности D , скорости распространения ультразвуковых волн V , модуля Юнга E , удельного электрического сопротивления ($УЭС$) ρ , термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) α ¹². Исследование этих величин является актуальной задачей, поэтому основной целью настоящей работы было изучение совокупности физических величин графитированных электродов, полученных на основе игольчатого кокса фирмы «Nichimen».

Экспериментальная часть

Измерение α проводилось на цилиндрических образцах диаметром 10 мм и длиной 100 мм лазерным dilatометром марки ДИД-1^{13–15}. Диапазон рабочих температур этого прибора составляет 30–100 °С. Диапазон измеряемых величин α : $(0.5–20) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Максимальная погрешность при измерении при температуре 100 °С составляет $3 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$. Интервал изменения термического коэффициента линейного расширения изученных образцов изменялся на порядок – от $2 \cdot 10^{-7}$ до $20 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. По этой причине относительная погрешность проведения данного эксперимента варьировалась от 1.5 до 15 %.

Методика измерения скорости ультразвука V подробно описана в¹⁶. Относительная погрешность метода составляла 1.5%.

Плотность D графитированных электродов определена с помощью измерения массы и объема образцов. Относительная погрешность определения плотности составляла 2.5 %.

Модуль Юнга E является комплексным показателем и вычислен по формуле¹⁷:

$$E = D \cdot V^2.$$

Обсуждение результатов

Выбор тела образцов углеродного изделия был обусловлен тем, что в процессе прошивного прессования наводится анизотропия свойств электрода за счет ориентации анизометричных зерен игольчатого кокса. Выстраивание зерен кокса по мере прохождения коксо-пековой заготовки через пресс носит неоднородный характер⁹. Периферийные участки прессуемого электрода перемещаются в прессе с несколько меньшей линейной скоростью, что обусловлено вязким трением с поверхностью металла. Следовательно, в периферийной зоне «зеленой» заготовки будущего электрода формируются более предпочтительные условия для продольной ориентации зерен наполнителя. В случае прессования заготовок разных диаметров на одной и той же прессовой установке происходит различное обжатие прессуемой массы. Этот технологический фактор также изменяет физические свойства графитированного электрода, в первую очередь анизотропию ТКЛР¹⁸.

Другим значимым технологическим фактором является пропитка. Стадия пропитки не только увеличивает плотность электродов, но и структурирует их. Кокс, образующийся из пропиточного пека, структурируется в разных участках объема электродного тела по-разному. Ультразвуковые исследования показали¹⁹, что за счет выхода летучих кокс из пропиточного пека имеет преимущественное направление ориентации графитовых слоев перпендикулярно оси прессования вблизи поверхности электрода.

Этими факторами обусловлен выбор образцов для измерений вдоль и поперек оси прессования как из центральной части графитированного электрода, так и из периферийных участков. Аналогично отбирали пробы также и из тел графитированных ниппелей.

На рис. 1 представлены экспериментально определенные статистические распределения dN_i/N , где $N = 112$ – полное число образцов в выборке; i – плотность D , скорость звука V или модуль Юнга E графитированных электродов с коксом марки «Nichimen» в качестве наполнителя.

Сплошная линия на рис. 2 соответствует нормальному распределению Гаусса со следующими параметрами: $E_0 = 15.3 \text{ ГПа}$ – мода распределения (отмечена на рисунке вертикальной пунктирной линией) и $E = 4.5 \text{ ГПа}$ – ширина на половине высоты. Видно, что экспериментальные результаты измерений D , V и E удовлетворительно соответствуют нормальному распределению. Величина $E_0 = 15.3 \text{ ГПа}$ соответствует требованиям ГОСТ для данного вида изделий¹⁴.

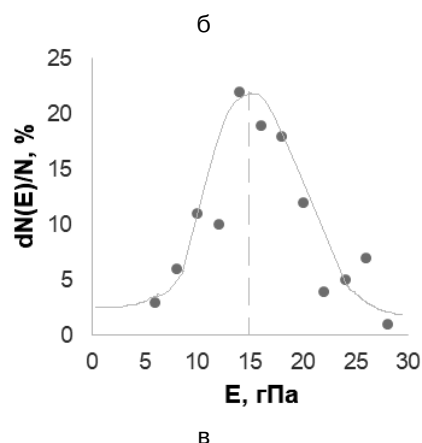
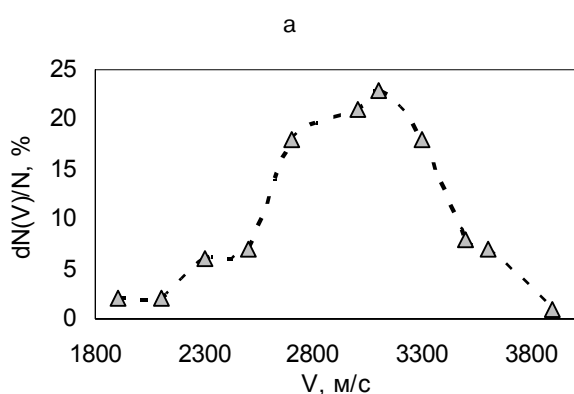
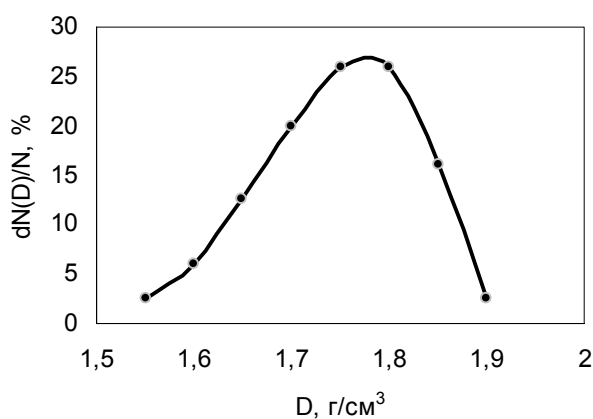


Рис. 1. Экспериментальное статистическое распределение в графитированных электродах: а – плотности; б – скорости звука; в – модуля Юнга

На рис. 2 представлены экспериментальные данные изучения величины удельного электросопротивления ρ на тех же образцах, что и модуль Юнга E . Как видно из рис. 2, статистическое распределение данных эксперимента по изучению УЭС существенно отличается от нормального. Можно скомпоновать результаты в 2 группы (линии 1 и 2 на рис. 2) со сходными зависимостями функции распределения $dN_k(\rho)/N$ в каждой группе ($k=1$ или 2). В этом случае сложно указать среднее значение измеряемой величины УЭС.

Обнаруженная двойственность в поведении функции $dN_k(\rho)/N$ для УЭС, вероятно, также

обусловлена существованием электрической анизотропии ($\rho_{\parallel} \neq \rho_{\perp}$) графитированных электродов. Знак « $\parallel$ » соответствует условию выборки образца вдоль оси прессования, а знак « $\perp$ » – поперек этой оси. Возможной причиной является также и двухфазность графитированного электрода. Графит из наполнителя и связующего существенно отличаются по электрическим показателям¹².

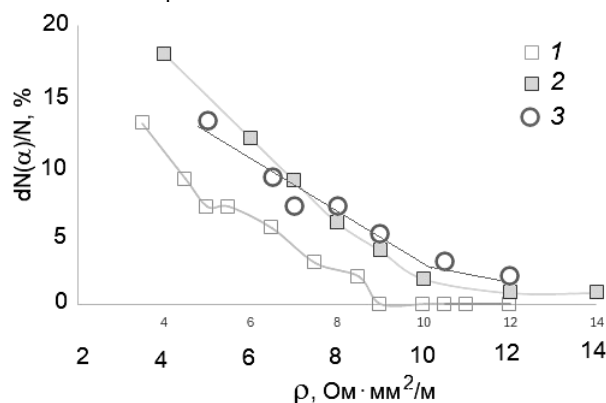


Рис. 2. Экспериментальное статистическое распределение ρ графитированных электродов (кокс марки «Nichimen»)

Таблица 1
Усредненные значения ТКЛР (10^{-7} K^{-1}) графитированных электродов с различным коксом-наполнителем

Поставщик кокса	$\alpha_{\parallel}$	$\alpha_{\perp}$
Mitsubishi	5.36	19.6
Nichimen	5.54	18.6
Carbaitе/Grafitе	6.23	22
Conoco	5.81	20.9

Сравнение экспериментальных результатов, (рис. 1–3), показывает, насколько неодинаково распределение разных по физической природе величин в анизотропной и неоднородной среде графитированного электрода. Поскольку наиболее значимым для производства является термический коэффициент линейного расширения, проанализируем в первую очередь экспериментальные результаты по ТКЛР (рис. 3).

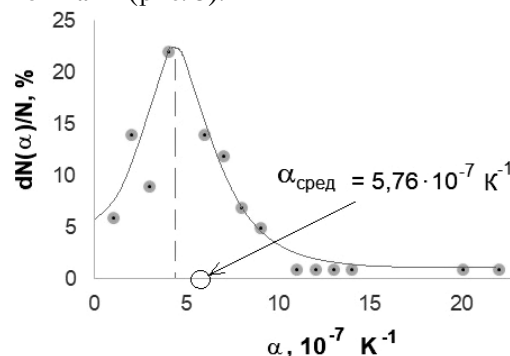


Рис. 3. Экспериментальное статистическое распределение α графитированных электродов (кокс марки «Nichimen»)

Как отмечено выше, распределение по выборке из 112 образцов имеет стандартный гауссовский колоколообразный вид. Однако в эксперименте обнаружено значительное смещение статистического распределения в область малых значений ТКЛР. При этом «хвост» распределения неминуемо попадает в область отрицательных значений коэффициента линейного расширения. И действительно, опыты по измерению ТКЛР высокоанизотропных графитов показывают, что поперечный коэффициент термического расширения имеет отрицательные значения: при тепловом расширении вдоль гексагональных слоев кристалл графита одновременно сжимается в перпендикулярном к слоям направлении.

В числе наиболее важных технологических факторов при изучении формирования анизотропии кристаллитов графита в пробах следует упомянуть процесс ориентации зерен кокса в течение процесса прессования. В ходе вибропрессования, а также в процессе прошивного прессования выявляется предпочтительная ориентация зерен кокса в направлении оси прессования. После прохождения отпрессованной заготовки по всем технологическим переделам в полученном графите наблюдается значительная анизотропия физико-механических характеристик. Кроме того, важнейшим фактором является и степень графитации²⁰, которая, в свою очередь, является функцией от конечной температуры обработки в печах графитации.

Графитацию электродных заготовок осуществляют либо в печах Кастнера, либо в печах Ачесона. Присущий этому процессу организационный недостаток (невозможность физически достичь однородного температурного поля во всем объеме графитируемой заготовки) приводит к значительному разбросу всех физико-механических свойств графита как в объеме одного электрода, так и между отдельными электродами в целом. В то же время потребителю безразличны теплофизические и физико-механические свойства выпускаемых электродов. Для металлургических предприятий важны следующие потребительские характеристики графитированных электродов:

- минимально возможный расход графита на тонну выплавленной стали;
- максимально возможное количество плавок, приходящееся на один электрод;
- отсутствие падения «огарков» в готовую жидкую сталь.

Чтобы удовлетворить эти потребительские качества, производители электродов используют серию вспомогательных параметров качества:

- удельное электросопротивление готового электрода (УЭС), Ом·м;
- плотность, кг/м³,

- прочность на изгиб, МПа;
- температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), 1/°С
- теплопроводность, Вт·м/°С;
- модуль Юнга, Па;
- пористость, %.

Значимость указанных параметров качества неравноценна. Принято считать, что наиболее важным параметром является УЭС электрода. Одновременно следует четко различать качество электродов по показателю УЭС и потребительское качество электрода в целом. Например, электрод может иметь низкое значение УЭС, но иметь плохое потребительское качество из-за высокого значения температурного коэффициента линейного расширения. Известно, что помимо УЭС, исключительно важным вспомогательным параметром качества графита является его температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Однако этот параметр определяется разрушающим методом и поэтому не может быть использован в качестве контролируемого параметра при экспресс-контроле готового изделия.

Значимость параметра ТКЛР можно обосновать результатами изучения свойств пропитанных электродов диаметром 500 мм, изготовленных на основе игольчатого кокса различного класса («Intermediat», «Superpremium»), представленными в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при повышенных энергозатрат на графитацию электроды на основе игольчатого кокса класса «Intermediat» практически по всем параметрам идентичны графитированным электродам на основе игольчатого кокса класса «Superpremium», за исключением значения ТКЛР. Несмотря на то, что электроды, изготовленные по единой технологии из рядового кокса и лучших сортов игольчатого кокса, совпадают по электропроводности (показатель УЭС), в то же время различаются по ТКЛР более чем в 2.5 раза.

Таблица 2
Свойства пропитанных графитированных электродов диаметром 500 мм из игольчатого кокса различных классов

Параметры	Кокс игольчатый класса	
	«Intermediat»	«Superpremium»
Удельный расход энергии на графитацию, кВт·ч/т	4000	3500
Плотность электродов, кг/м ³	1700	1700
УЭС электродов, мкОм·м (среднее значение)	5.7	5.7
Прочность на изгиб, Па (среднее значение)	130	130
ТКЛР, К ⁻¹ ·10 ⁻⁷ (среднее значение)	17	6

Однако именно этот показатель является ключевым в определении термopочности полу-чаемого графита. Именно это обстоятельство (разница в ТКЛР) не позволяет выпускать графитированные электроды для дуговых электросталеплавильных печей сверхвысокой мощности (марок UHP – Ultra High Power) из игольчатых коксов класса ниже «Superpremium».

Литература

1. Шайдарова Л.Г., Поздняк А.А., Гедмина А.В., Будников Г.К. Селективное вольтамперометрическое определение парацетамола и ацикловира на электроде, модифицированном восстановленным оксидом графена и частицами золота // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2024. – Т.166, кн.3. – С.401-413.
2. Гимадудинова Л.Т., Зиятдинова Г.К. Вольтамперометрический способ определения судана I для контроля качества пищевых продуктов // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2023. – Т.165, кн.3. – С.374-392.
3. Min C.G., Lim C., Myeong S., Ha N., Lee Y.-S. Improved electrochemical properties of lithium-ion batteries prepared using oxygen plasma-treated needle coke-based anode materials // Materials Today Communications. – 2024. – V.41. – P.110760.
4. Wang Y., Su B., Yuan C. An integrated simulation and experimental study of calendaring process in water-based manufacturing of lithium-ion battery graphite electrode // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – V.131. – Pp.861-865.
5. Hu X., Xu H.-L., Dong L.-Y., Li W.-C., Hao G.-P., An-Hui Lu A.-H. Design of graphitic multichannel monolith electrode with *in situ* transformed Ni–N–C sites for continuous electrolysis of CO₂ // Chemical Engineering Journal. – 2024. – V.500. – P.157133.
6. Li X., Wang L., Xie Y., Yao Q., Sun M. Preparation of needle coke from low-temperature coal tar pitch based on modification, component separation and component blending // Carbon. – 2024. – V.230. – P.119686.
7. Xie Y., He L., Li X., Yao Q., Sun M. The effect of formaldehyde modification on the structure of needle coke prepared from a modified low temperature coal tar pitch // Fuel. – 2024. – V.370. – P.131824.
8. Lim C., Ha S., Myeong S., Ha N., Min C.G., Lee Y.-S. Production of needle cokes via mild condition copyrolysis of FCC-DO and PFPE // Fuel. – 2024. – V.360. – P.130622.
9. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. – М.: Аспект Пресс, 1997. – 718 с.
10. Dong K., Sun Z., Wang J., Jing G., Kong L., Tang B., Wu S., Huang X., You X., Liu Y., Guo F. Hierarchical porous self-supporting graphite carbon electrodes based on the biomimetic structure for supercapacitors // Journal of Power Sources. – 2024. – V.623. – P.235467.
11. Kumar R., Subramanian K.A. Performance enhancement of hydrogen PEM fuel cell using graphene coated graphite electrodes // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – V.190, Part A. – Pp.48-59.

Наиболее эффективный путь в этом направлении – применение специальных сортов игольчатого кокса, характеризующихся именно низким ТКЛР. Влияние конечной температуры термообработки при графитации на ТКЛР графитов также велико, однако наличие даже самых лучших условий термообработки, как показано выше, не позволяет компенсировать недостаточную игольчатость кокса.

References

1. Shaidarova L.G., Pozdnyak A.A., Gedmina A.V., Budnikov G.K. *Selektivnoye vol'tamperometricheskoye opredeleniye parasetamola i atsiklovira na elektrode, modifitsirovannom vosstanovlennym oksidom grafena i chastitsami zolota* [Selective voltammetric determination of paracetamol and acyclovir on an electrode modified with reduced graphene oxide and gold particles]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], 2024, vol.166, book 3, pp.401-413.
2. Gimadutdinova L.T., Ziyatdinova G.K. *Vol'tamperometricheskiiy sposob opredeleniya sudana I dlya kontrolya kachestva pishchevykh produktov* [Voltammetric method for determining Sudan I for quality control of food products]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], 2023, vol.165, book 3, pp.374-392.
3. Min C.G., Lim C., Myeong S., Ha N., Lee Y.-S. [Improved electrochemical properties of lithium-ion batteries prepared using oxygen plasma-treated needle coke-based anode materials]. *Materials Today Communications*, 2024, vol.41, p.110760.
4. Wang Y., Su B., Yuan C. [An integrated simulation and experimental study of calendaring process in water-based manufacturing of lithium-ion battery graphite electrode]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol.131, pp.861-865.
5. Hu X., Xu H.-L., Dong L.-Y., Li W.-C., Hao G.-P., An-Hui Lu A.-H. [Design of graphitic multichannel monolith electrode with *in situ* transformed Ni–N–C sites for continuous electrolysis of CO₂]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, vol.500, p.157133.
6. Li X., Wang L., Xie Y., Yao Q., Sun M. [Preparation of needle coke from low-temperature coal tar pitch based on modification, component separation and component blending]. *Carbon*, 2024, vol.230, p.119686.
7. Xie Y., He L., Li X., Yao Q., Sun M. [The effect of formaldehyde modification on the structure of needle coke prepared from a modified low temperature coal tar pitch]. *Fuel*, 2024, vol.370, p.131824.
8. Lim C., Ha S., Myeong S., Ha N., Min C.G., Lee Y.-S. [Production of needle cokes via mild condition copyrolysis of FCC-DO and PFPE]. *Fuel*, 2024, vol.360, p.130622.
9. Fialkov A.S. *Uglerod, mezhsloyevyye soyedineniya i kompozity na yego osnove* [Carbon, interlayer compounds and composites based on it]. Moscow, Aspect Press Publ., 1997, 718 p.
10. Dong K., Sun Z., Wang J., Jing G., Kong L., Tang B., Wu S., Huang X., You X., Liu Y., Guo F. [Hierarchical porous self-supporting graphite carbon electrodes based on the

12. Патент РФ 2089890 С1. Интерференционный dilatometr для измерения ТКЛР малорасширяемых твердых материалов / Амадуни А.Н., Компан Т.А., Тагабилев Г.Х., Шувалов В.И., Мочалов В.В. // Опубл. 10.09.1997.
13. Патент РФ №2807875С1. Способ оценки качества сырья для получения игольчатого кокса / Запорин В.П., Долوماتов М.Ю., Сухов С.В., Осипенко Д.Ф., Долوماتова М.М.// Б.И.– 2023.– №33.
14. Сон Э.Е. Современные исследования теплофизических свойств веществ // Теплофизика высоких температур.– 2013.– Т.51, №3.– С.392-411.
15. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л. Дифракционная dilatometriya полиметилметакрилата в области низких температур // Оптика и спектроскопия.– 2018.– Т.124, №3.– С.416-419.
16. Михайлюк Г.М., Бабкин М.Ю., Негуторов Н.В. Ультразвуковой контроль nipple-образных заготовок // Цветные металлы.– 1999.– №10.
17. Ерохин К.М., Калашников Н.П. Связь макроскопических величин с микроскопическими характеристиками твердого тела // Профессорский журнал. Серия: Технические науки.– 2019.– №2(2).– С.33-39.
18. Кузнецов Д.М. Факторы, определяющие температурный коэффициент линейного расширения графита // Огнеупоры и техническая керамика.– 1999.– №11.
19. Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л., Буйло С.И. Исследование циклической термостойкости углеродистых материалов // Вестник Донского государственного технического университета.– 2014.– Т.14, №1(76).– С.144-153.
20. Храменкова А.В., Финаева О.А., Лаптий П.В., Мوشченко В.В., Арзуманова А.В., Кузнецов Д.М., Яценко Е.А. К вопросу о механизме формирования гибридных электродных материалов, полученных методом нестационарного электролиза. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.– 2023.– С.60-64.
11. Kumar R., Subramanian K.A. [Performance enhancement of hydrogen PEM fuel cell using graphene coated graphite electrodes]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, vol.190, part A, pp.48-59.
12. Amatuni A.N., Kompan T.A., Tagabiev G.Kh., Shuvalov V.I., Mochalov V.V. *Interferentsionnyy dilatometr dlya izmereniya TKLR malorasshirayemykh tverdykh materialov* [Interference dilatometer for measuring the coefficient of linear expansion of low-expandability solid materials]. Patent RF no.2089890C1, 1997.
13. Zaporin V.P., Dolomatov M.Yu., Sukhov S.V., Osipenko D.F., Dolomatova M.M. *Sposob otsenki kachestva syr'ya dlya polucheniya igol'chatogo koksa* [Method for assessing the quality of raw materials for producing needle coke]. Patent RF no.2807875C1, 2023.
14. Son E.E. *Sovremennyye issledovaniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv* [Modern studies of thermophysical properties of substances]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Thermophysics], 2013, vol.51, no.3, pp.392-411.
15. Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Galyautdinov M.F., Stepanov A.L. *Difraktsionnaya dilatometriya polimetilmetakrilata v oblasti nizkikh temperatur* [Diffraction dilatometry of polymethyl methacrylate in the low-temperature region]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2018, vol.124, no.3, pp.416-419.
16. Mikhailyuk G.M., Babkin M.Yu., Negutorov N.V. *Ul'trazvukovoy kontrol' nipple'nykh zagotovok* [Ultrasonic testing of nipple blanks]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 1999, no.10.
17. Erokhin K.M., Kalashnikov N.P. *Cvyaz' makroskopicheskikh velichin s mikroskopicheskimi kharakteristikami tverdogo tela* [Relationship between macroscopic quantities and microscopic characteristics of a solid]. *Professorskiy zhurnal. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Professor's journal. Series: Technical sciences], 2019, no.2 (2), pp.33-39.
18. Kuznetsov D.M. *Faktory, opredelyayushchiye temperaturnyy koefitsiyent lineynogo rasshireniya grafita* [Factors determining the temperature coefficient of linear expansion of graphite]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and technical ceramics], 1999, no.11.
19. Kuznetsov D.M., Gaponov V.L., Buylo S.I. *Issledovaniye tsiklicheskoj termoprochnosti uglegrafitovykh materialov* [Study of cyclic thermal strength of carbon-graphite materials]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2014, vol.14, no.1 (76), pp.144-153.
20. Khramenkova A.V., Finaeva O.A., Laptiy P.V., Moshchenko V.V., Arzumanova A.V., Kuznetsov D.M., Yatsenko E.A. *K voprosu o mekhanizme formirovaniya gibridnykh elektrodnykh materialov, poluchennykh metodom nestatsionarnogo elektroliza* [On the mechanism of formation of hybrid electrode materials obtained by non-stationary electrolysis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences], 2023, pp.60-64.