

УДК 661.481.7

DOI: 10.15372/KhUR2019151

## Исследование свойств коксовых пластин марок “ВХК” и “Донкарб”

В. Л. СОФРОНОВ<sup>1</sup>, А. С. БУЙНОВСКИЙ<sup>1</sup>, Ю. П. ДАММ<sup>1</sup>, А. В. ПОЛЯНСКАЯ<sup>1</sup>, Л. М. ЛЕВЧЕНКО<sup>2</sup>, В. С. ХОРОХОРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Северск, Томская обл. (Россия)

E-mail: VLSofronov@mephi.ru

<sup>2</sup>Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск (Россия)

E-mail: Luda@niic.nsc.ru

(Поступила 27.04.18; после доработки 23.04.19)

### Аннотация

Опыт эксплуатации анодных материалов, используемых при производстве фтора, показывает, что не все пластины, удовлетворяющие требованиям технических условий (ТУ 48-12-34-95), обладают необходимым сроком службы и разрушаются достаточно быстро при использовании. Для оценки качества проведены исследования коксовых пластин (КП) российских производителей с применением дифференциального термического анализа, рентгеноструктурного анализа, атомно-эмиссионной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии, различных физико-механических и электрических методов. Определены следующие технические характеристики КП двух различных марок: “Донкарб” производства ООО “Донкарб Графит” (г. Челябинск) и “ВХК” производства ООО “Волжский химкомплекс” (г. Волжский): пористость, зольность, плотность, прочность на сжатие, удельное электрическое сопротивление. Установлено, что они вполне удовлетворяют требованиям ТУ. Показано, что суммарное содержание примесей в КП марки “Донкарб” составляет 0.50 мас. %, марки “ВХК” – 0.33 мас. %. Выявлено, что для образцов марки “Донкарб” характерен размер пор 0.6–12 мкм, а для образцов “ВХК” – более 117 мкм. Установлено наличие в КП обеих марок турбостратной структуры углерода с параметрами  $d_{002} = 0.347–0.345$  нм. По результатам дифференциального термического анализа проведена классификация КП по термической стойкости. Использование полученных данных в дополнении к показателям ТУ 48-12-34-95 позволяет улучшить оценку качества КП и достоверно прогнозировать срок их службы.

**Ключевые слова:** коксовые пластины, атомно-эмиссионный анализ, сканирующая электронная микроскопия, дифференциальный термический анализ, рентгеноструктурный анализ

### ВВЕДЕНИЕ

В атомной промышленности для получения гексафторида урана ( $UF_6$ ), применяемого для разделения изотопов урана, используют газообразный фтор. Производство фтора осуществляют электролизом расплава гидродифторида калия  $KF \cdot 2HF$ , последний получают

насыщением расплава фторида калия газообразным фтороводородом. Промышленный электролизер состоит из корпуса с параллельно расположенными в нем электродными ячейками, системы охлаждения, углеродных анодов, жалюзийных коробчатых катодов, газоразделительного колокола для сбора анодного газа – фтора [1].

В качестве анодных материалов наиболее широко используют коксовые пластины (КП), которым предъявляются следующие требования [2]: химическая стойкость по отношению к фтору и фтороводороду, высокая механическая прочность в процессе эксплуатации, небольшое электросопротивление и хороший электрический контакт с медным токоподводом.

Срок службы и межремонтная наработка электролизеров зависят, прежде всего, от качества КП, используемых для изготовления анодов. Отсюда следует, что для улучшения технико-экономических показателей процесса получения фтора необходимо знать свойства и характеристики КП.

Исходным сырьем для получения КП служат нефтяной или каменноугольный пиролизный малосернистый кокс определенного фракционного состава и нефтяной или каменноугольный пек. Технология изготовления пластин включает прессование заготовок, их двойной обжиг по специальным графикам и промежуточную пропитку пеком в автоклаве [3].

Коксовые пластины неоднородны по химическому и фазовому составам, содержат как минимум две разновидности углеродистого кокса, вступающие в реакцию с кислородом воздуха при разных температурах и с разной максимальной скоростью [1].

Качество КП, применяемых для изготовления анодов фторных электролизеров, должно отвечать требованиям ТУ 48-12-34-95 «Пластины коксовые обожженные». Данные ТУ устанавливают следующие показатели и требования к КП [4]: кажущаяся плотность – не менее 1.64 кг/дм<sup>3</sup>, прочность на сжатие – не менее 58.8 МПа, пористость – не более 21 %, содержание золы – не более 0.6 %, удельное электрическое сопротивление – не более (25–40) мкОм·м.

Многими авторами проведены исследования КП. Так, в работе [5] утверждается, что эксплуатационная стойкость анодов определяется в основном структурой и природой материала наполнителя и кокса-связки. В работе [6] установлено, что разрушение пластин происходит на участках с наименьшим и наибольшим значениями температуры (70–80 и 200 °С). При этом меньшую температуру имеет нижняя часть КП. Авторы [7] показали, что одной из причин разрушения КП является неудовлетворительная защита зоны контакта медного токоподводящего штока с КП.

Опыт промышленных эксплуатаций анодных пластин в производстве фтора показал, что не все аноды, которые удовлетворяют требовани-

ям ТУ, имеют необходимые сроки службы. Это свидетельствует о том, что для оценки качества КП недостаточно показателей ТУ 48-12-34-95. В связи с этим нами проведены комплексные исследования КП с помощью различных химических, физико-химических, физико-механических и электрических методов.

Цель работы – комплексный анализ качества КП, выпускаемых российскими производителями, для оценки возможности их использования при производстве фтора в России.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Методы исследования

Исследованы КП производства ООО «Донкарб Графит» (г. Челябинск), далее – «Донкарб»; и ООО «Волжский химкомплекс» (г. Волжский), далее – «ВХК».

Коксовые пластины изготовлены из материалов с низкой степенью термообработки (температура прокаливания кокса 1250±50 °С, температура обжига 1200–1300 °С). Проанализировано не менее шести пластин каждой марки, каждый анализ проводили трехкратно. Озоление проб осуществляли в корундовом тигле в муфельной печи при температуре 815±15 °С в течение 8 ч.

Исследования и анализы КП выполняли с использованием методов физико-механического, химического и физико-химического анализа, таких как дифференциальный термический анализ (ДТА), рентгеноструктурный анализ (РСА), атомно-эмиссионная спектроскопия (АЭС), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) в соответствии с методиками, описанными в работах [8–20]. Предел прочности на сжатие, кажущуюся плотность, пористость, содержание золы и удельное электрическое сопротивление материала КП определяли по стандартным методикам [21–24].

**Химический анализ** исходных КП и золы проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6200 DUO (Thermo Scientific, США). Вскрытие (растворение) проб, отобранных из исходных КП и полученной золы, проводили в микроволновой системе MARS 6 (СЕМ, США) по методике, приведенной в ГОСТ Р 54237 «Топливо твердое минеральное» [25]. Озоление проб осуществляли в корундовом тигле в муфельной печи при температуре 815±15 °С. Достоинствами АЭС являются экспрессность, возможность количественного определения большого числа элементов в жидком, твердом и газообразном состояниях в ши-

роком интервале концентраций с высокой точностью (до  $10^{-5}$  %) при использовании малой массы пробы [8].

**Исследование распределения пор по размерам** в материалах пластин выполняли на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 SBH (Tescan, Чехия) с энергодисперсионной приставкой X-Act. Для каждого образца получили не менее пяти снимков с внешней поверхности при различных увеличениях и провели не менее 500 измерений видимых пор. Сканирующая электронная микроскопия – один из наиболее широко используемых для диагностики методов. Предел разрешения сканирующего электронного микроскопа приближается к нескольким нанометрам, а увеличение легко варьируется от  $\sim 10$  до более 300 000. При наличии приставки для рентгенофлуоресцентного анализа СЭМ предоставляет сведения о топографии поверхности, химическом составе веществ и визуализации неоднородности поверхности в пределах одного слоя [9, 16, 17].

**Термогравиметрический анализ** проб КП проводили на дериватографе SDP Q600 (TA, Intertech, США), образцы нагревали до  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

Для контроля качества материалов КП использовали следующие показатели их окисляемости:

–  $\Delta A$ , % – убыль массы пробы по термогравиметрической кривой (ТГ) на максимуме кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) дериватограммы;

–  $B$ , % – отношение второго по интенсивности экстремума к сумме интенсивностей обоих экстремумов на кривой дифференциальной термогравиметрической (ДТГ) дериватограммы;

–  $\Delta T$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – разность температур второго и первого экстремумов ДТГ кривой дериватограммы.

Показатели  $B$  и  $\Delta T$  позволяют оценить содержание графитизированных структур или содержание упорядоченной структурной модификации, показатель  $\Delta A$  – скорость и полноту окисления материала КП.

**Оценку сортности КП** проводили согласно методике, которая применяется на ОАО "Ангарский электролизный химический комбинат" [19]:

1) класс качества 1 (I сорт):  $\Delta A \leq 55\text{ }%$ ;  $B = 0\text{ }%$ ;  $\Delta T \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; количество пиков  $n = 1, 2$ ;

2) класс качества 2 (II сорт):  $\Delta A = 56\text{--}65\text{ }%$ ;  $B = 51\text{--}56\text{ }%$ ;  $\Delta T = 41\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $n = 2$ ;

3) класс качества 3 (III сорт):  $\Delta A = 66\text{--}70\text{ }%$ ;  $B = 57\text{--}60\text{ }%$ ;  $\Delta T = 61\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $n = 2$ ;

4) класс качества 4 (IV сорт):  $\Delta A \geq 71\text{ }%$ ;  $B = 61\text{--}70\text{ }%$ ;  $\Delta T \geq 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $n = 3$ .

**Дифференциальный термический анализ** (ДТА) является наиболее распространенным методом термического анализа из-за широкого спектра получаемой информации. Метод позволяет установить наличие или отсутствие фазовых превращений, характер течения процесса во времени, смещение того или иного эффекта под действием внешних причин, температуру начала и окончания процесса [19]. С помощью ДТА возможно измерение следующих величин: температур стеклования, кристаллизации, плавления, сублимации и других характеристик.

Исследование структуры и проведение входного контроля материала КП выполнены методом PCA с помощью дифрактометра ARL X'TRA (Thermo Scientific (Швейцария)),  $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучение ( $\lambda = 0.1541\text{ нм}$ ). Достоинствами данного метода по сравнению с другими является то, что практически все сведения о строении вещества можно получить с помощью одного инструмента – рентгеновских лучей, изучая их взаимодействие с исследуемым веществом [26]. Межплоскостное расстояние в пакетах ( $d_{002}$ ), толщину пакета ( $L_c$ ), ширину углеродного слоя ( $L_a$ ) определяли согласно [27], плотность упаковок ( $\rho$ ) – согласно [28].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты исследований технических характеристик КП марок "Донкарб" и "ВХК", а также их показатели согласно требованиям ТУ 48-12-34-95 и сертификатам поставщиков (в скобках). Видно, что практически все рассматриваемые характеристики КП марок "Донкарб" и "ВХК" соответствуют требованиям ТУ 48-12-34-95. Исключение составляет ряд показателей для пластин "ВХК", у которых, по данным наших анализов, значение плотности несколько меньше требований ТУ, а значение пористости, напротив, больше. Возможно, это связано с использованием современного аналитического оборудования.

В табл. 2 представлены средние значения содержания элементов в шести пластинах каждой марки и в золе.

Следует отметить, что техническими условиями состав КП не нормирован, за исключением содержания серы (не более 0.3 мас. %) и углерода (не менее 99 мас. %). При проведении озоления часть элементов (сера и фосфор) теряются в виде летучих соединений. По данным анализа разброс содержания элементов в КП и золе составил  $\pm 25\text{ }%$ .

ТАБЛИЦА 1

Технические характеристики КП российских производителей

Марка КП	Прочность на сжатие, МПа, не менее	Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее	Пористость, %, не более	Зольность, %, не более	Удельное электрическое сопротивление, мкОм · м, не более
ТУ 48-12-34-95	58.8	1.64	21	0.6	25-40
“Донкарб”	59.9±7.1 (116)	1.64±0.03 (1.75)	18.0±1.1 (13)	0.40±0.05 (0.6)	40.5±0.3 (38.9)
“ВХК”	59.3±6.5 (58.8)	1.61±0.01 (1.64)	24.8±0.1 (21)	0.40±0.05 (0.6)	39.0±1.0 (40)

Примечание. В скобках приведены значения из сертификатов поставщиков.

ТАБЛИЦА 2

Результаты химического анализа коксовых пластин и золы

Элемент	Содержание примесей в КП, мас. %		Содержание примесей в золе <sup>а</sup> , мас. %	
	“Донкарб”	“ВХК”	“Донкарб”	“ВХК”
Al	0.0425	0.0381	0.0463	0.0417
Ba	0.0006	0.0003	0.0006	0.0004
Ca	0.0102	0.0415	0.0120	0.0450
Fe	0.2159	0.0469	0.2122	0.0403
K	0.0418	0.0045	0.0451	0.0040
Mg	0.0037	0.0050	0.0035	0.0034
Mn	0.0026	0.0010	0.0028	0.0011
Na	0.0244	0.0364	0.0210	0.0345
P	0.0145	0.0426	0.0008	0.0104
S	0.0505	0.0538	0.0020	0.0056
Si	0.0839	0.0569	0.0637	0.0594
Sr	0.0008	0.0003	0.0007	0.0005
Ti	0.0026	0.0021	0.0018	0.0016

<sup>а</sup> Состав пересчитан на массу образца, взятого на озоление.

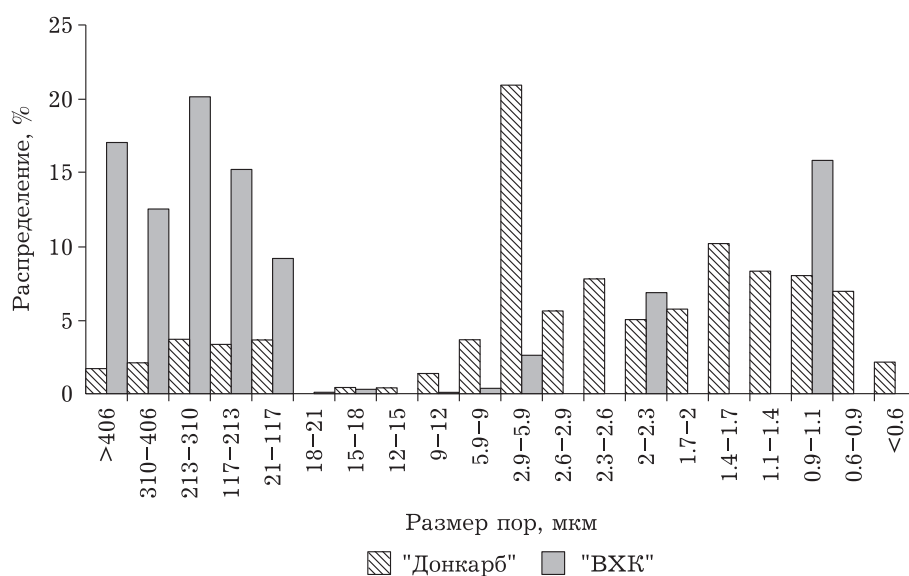


Рис. 1. Распределение пор в пластинах марок “Донкарб” и “ВХК”.

Суммарное содержание всех примесей в КП марки "Донкарб" не превышает 0.50 мас. %, а в пластинах марки "ВХК" – 0.33 мас.%. Содержание основной вредной примеси – серы – в пластинах обеих марок не превышает 0.054 мас. %, а фосфора – 0.043 мас. %. Основной примесью в материалах марки "Донкарб" является железо, его среднее содержание составляет 0.216 мас. %. В пластинах марки "ВХК" наблюдается более однородный по содержанию состав примесей и отсутствуют ярко выделяющиеся элементы. В пробах разных партий КП "Донкарб" наблюдается некоторая неоднородность по содержанию алюминия, кальция, железа, кремния и серы, а в пробах "ВХК" неоднородность проявляется для кальция, калия, магния и алюминия.

Результаты анализа распределения пор по размерам представлены на рис. 1.

Видно, что размер большей части пор в образцах марки "Донкарб" находится в интервале 0.6–12 мкм. Распределение размеров пор в этой пластине следующее: 82 % пор – в пределах 0.6–12 мкм, 1 % – 12–117 мкм и 17 % – 117–406 мкм. Для образца "ВХК" характерно присутствие крупных пор: размер 65 % пор превышает 117 мкм, примерно 16 % пор имеют малые размеры – 0.9–1.1 мкм.

Результаты ДТА КП представлены в табл. 3, а типичные примеры полученных дериватогрaмм – на рис. 2 и 3.

При исследовании пластин марки "ВХК" обнаружены в основном двойные пики на кривой ДТГ, поэтому данные пластины отнесены ко II и III сортам. При этом потери массы в точках экстремумов, соответствующие пикам 1 и 2, примерно одинаковы.

Для марки пластин "Донкарб" характерен один пик на кривой дериватогрaммы при температуре  $630 \pm 5$  °С, т. е. пик появляется при более низкой температуре по сравнению с КП марки "ВХК". Это свидетельствует о том, что данные пластины, видимо, получены при более низких температурах. Пластины по качеству относятся к I (пластины 1–3) и II сортам, так как значение показателя скорости и полноты окисления ( $\Delta A$ ) больше 55 %.

Дифракционные профили образцов "Донкарб" и "ВХК" представлены на рис. 4 и 5. Видно, что на дифрактограммах обоих образцов при  $2\theta = 15\text{--}50^\circ$  присутствуют два рефлекса (002), (10), характеризующие структуру углерода КП. Результаты РСА и параметры структуры материала КП представлены в табл. 4. Видно, что строение углерода обоих образцов соответствует турбостратной структуре [29], образующейся в процессе карбонизации аморфного углерода при температуре до 1500 °С. Так, величина  $d_{002}$  для обоих КП незначительно отличается от литературных данных ( $d_{002} = 0.344$  нм) [30]. Размеры пакетов для обоих образцов КП близки и составляют  $L_c = 6.9\text{--}7.6$  нм,  $L_a = 14.6\text{--}17.5$  нм, а их плотность  $\sim 2.2$  г/см<sup>3</sup>.

ТАБЛИЦА 3

Результаты ДТ анализа коксовых пластин

Марка КП	Номер пластины	$\Delta A$ , %	$B$ , %	$\Delta T$ , °С	Температура пика, °С	Класс качества (сорт)
"Донкарб"	1	54.1	0	0	617	I
	2	53.8	0	0	616	I
	3	55.0	0	0	621	I
	4	56.1	0	0	622	II
	5	58.3	0	0	630	II
	6	61.6	0	0	638	II
"ВХК"	1	38.5	0	0	659	I
	2	34.0	34.8	78	645	II
		84.5	723			
	3	32.7	36.3	63	650	II
		75.5	713			
	4	3.5	37.8	50	680	II
8.4		730				
5	3.6	37.8	60	657	III	
	7.3	717				
6	31.4	37.5	69	649	III	
	77.9	718				

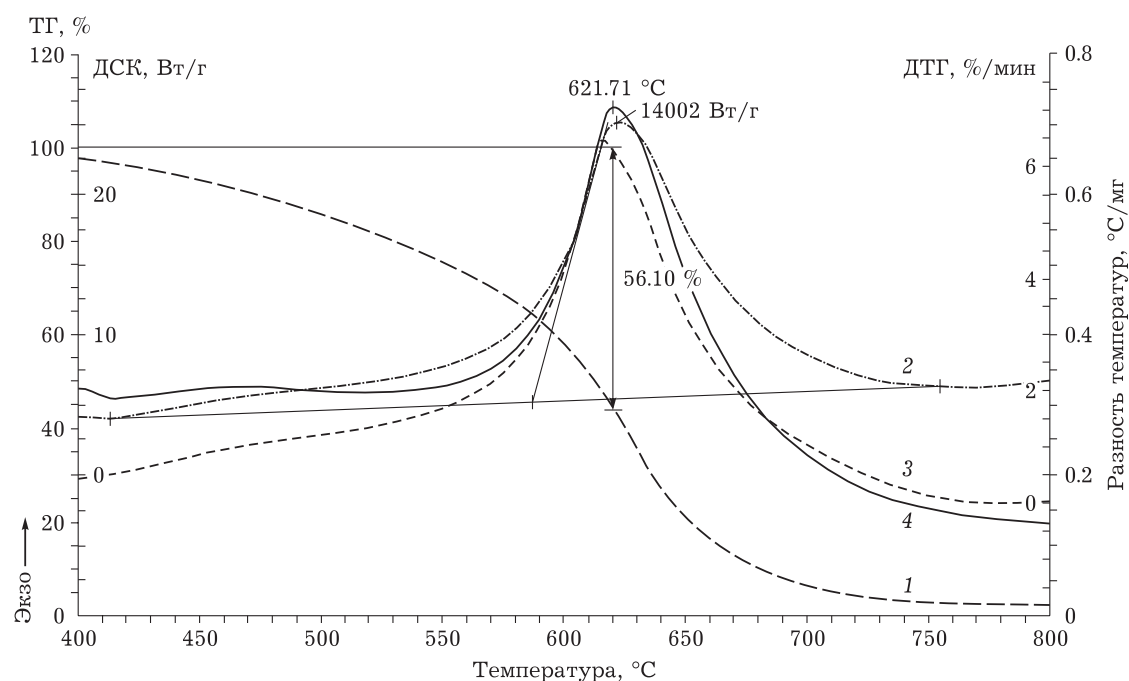


Рис. 2. Дериватограмма для коксовой пластины "Донкарб" № 4.

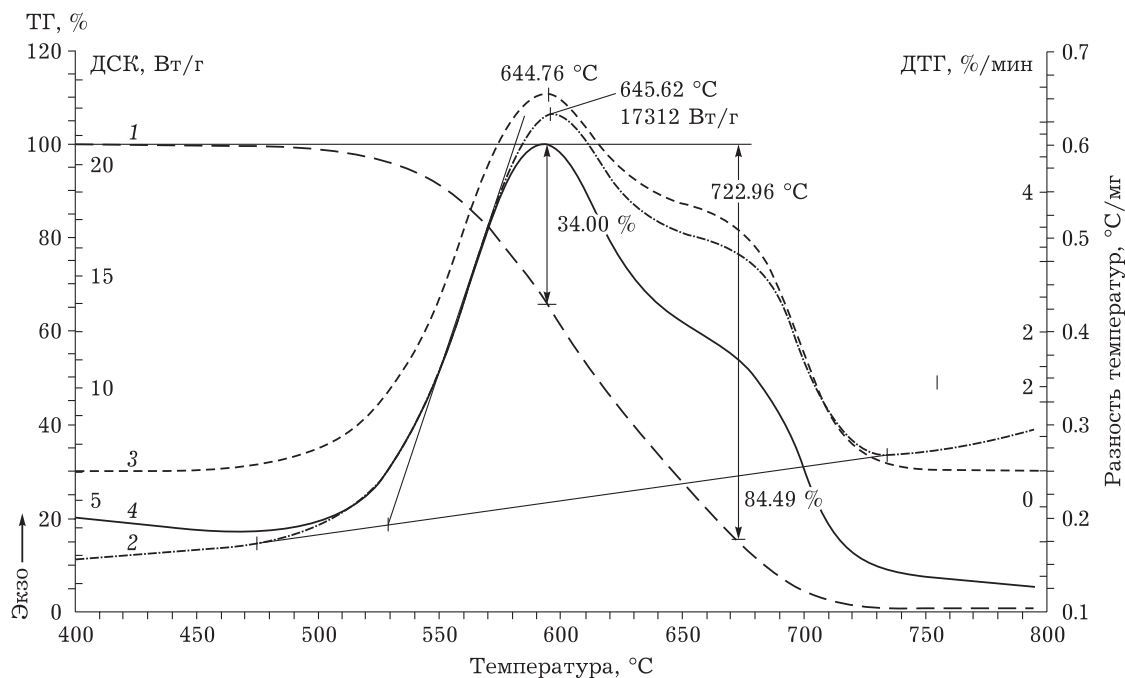


Рис. 3. Дериватограмма для коксовой пластины "ВХК" № 2.

ТАБЛИЦА 4

Результаты рентгеноструктурного анализа и параметры структуры коксовых пластин

Марка КП	$d_{002}$ , нм	$L_c$ , нм	$L_a$ , нм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Полуширина рефлекса (002), град	Полуширина рефлекса (10), град
"Донкарб"	0.347	6.93	1.62	2.19	2.35	3.72
"ВХК"	0.345	7.61	17.54	2.21	2.14	3.10

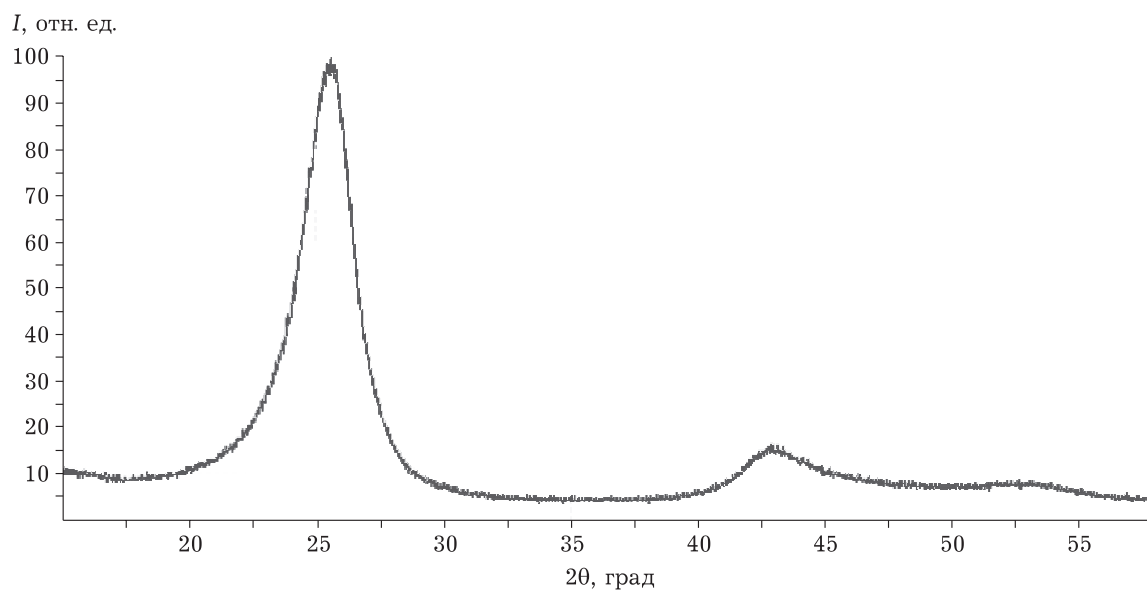


Рис. 4. Дифракционный профиль образца "Донкарб".

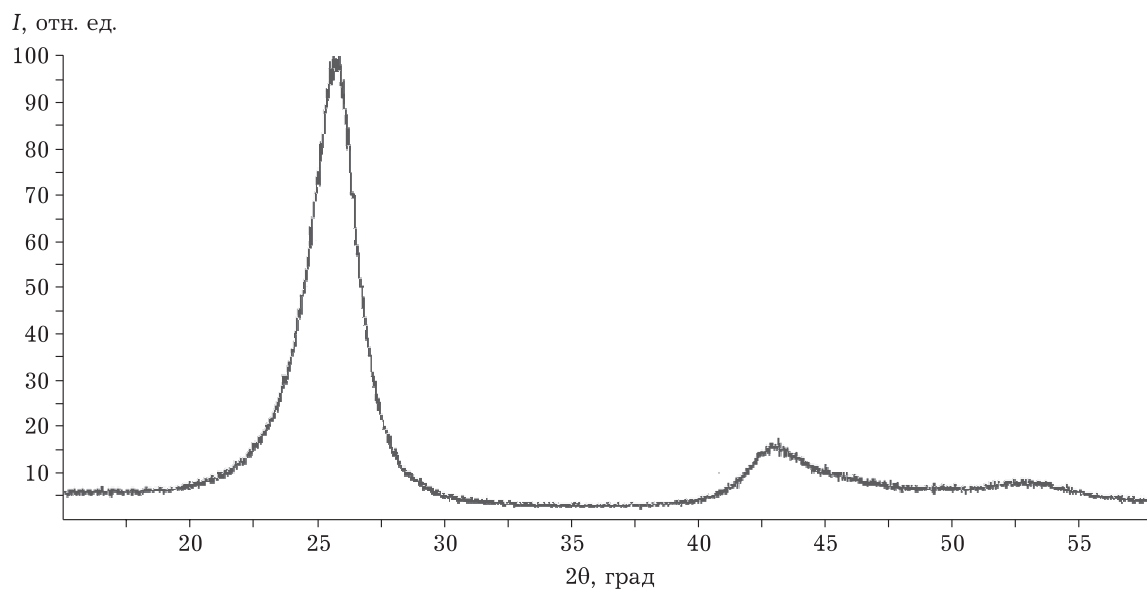


Рис. 5. Дифракционный профиль образца "ВХК".

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано качество КП, используемых для изготовления анодов фторных электролизеров, производимых российскими предприятиями ООО "Донкарб Графит" (маркировка "Донкарб") и ООО "Волжский химкомплекс" (маркировка "ВХК"). Показано, что КП этих производителей в основном удовлетворяют требованиям ТУ 48-12-34-95 "Пластины коксовые обожженные", действующим в Российской Федерации. Установлено, что химические составы КП близки. Суммарное содержание примесей в

них не превышает 0.50 мас. %. В целом, содержание основной вредной примеси – серы – в образцах не превышает 0.054 мас. %, а это позволяет предположить, что на этих предприятиях КП получены из малосернистых кокса и пека.

Для пластин "Донкарб" в основном характерны размеры пор в диапазоне 0.6–12 мкм, тогда как для пластин марки "ВХК" – более 117 мкм. По результатам РСА показано наличие в КП турбостратной структуры углерода с параметрами  $d_{002} = 0.347\text{--}0.345$  нм,  $L_c = 6.9\text{--}7.6$  нм,  $L_a = 14.6\text{--}17.5$  нм, что свидетельствует об их пригодности для проведения опытно-промыш-

ленных испытаний в производстве фтора [18, 19]. В результате ДТА определена сортность пластин: к I сорту отнесены три пластины марки “Донкарб” и одна пластина марки “ВХК”, остальные пластины обеих марок отнесены ко II и III сортам.

Коксовые пластины I и II сорта, на наш взгляд, следует использовать для изготовления анодов и дальнейшей проверки их эксплуатационных характеристик в опытных условиях производства фтора.

С использованием полученных в настоящей работе данных и показателей ТУ 48-12-34-95 возможно достоверно оценить качество пластин и прогнозировать срок их службы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зусайлов Ю. Н., Бадеников В. Я. // Сб. науч. трудов Ангар. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 1, № 1. С. 72–75.
- 2 Зусайлов Ю. Н., Бадеников В. Я. // Сб. науч. трудов Ангар. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 1, № 1. С. 87–91.
- 3 Софронов В. Л., Жеронкина О. Г., Холина К. В., Дамм Ю. П. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 4/2. С. 114–123.
- 4 ТУ 48-12-34-95. Пластины коксовые обожженные. 2008. 11 с.
- 5 Фокин В. П., Малахов А. А., Малахов С. А., Сошкин С. В. // Цветные металлы. 2002. № 4. С. 48–51.
- 6 Sadler V. A. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. Vol. 5, No. 8. P. 546–568.
- 7 Беляев В. М. // Изв. Том. политехн. ун-та. 2003. Т. 306, № 6. С. 85–90.
- 8 Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
- 9 Власов А. И. Электронная микроскопия: Учеб. пособие / М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 168 с.
- 10 Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. // J. Electrochem. Soc. Japan. 1961. Vol. 29. P. 180–186.
- 11 Bai L., Conway B. // Journal of Applied Electrochemistry. 1990. V. 20, No. 6. P. 925–931.
- 12 Shahrai S. G., Sharypov N. A., Mikhalev U. G. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, No. 19. P. 8976–8985.
- 13 Lantelme F., Groult H., Belhomme C., Morel B., Nicolas F. // J. New Materials for Electrochem. Systems. 2006. Vol. 9, No. 3. P. 283–290.
- 14 Moore G. L. Introduction to Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. Elsevier Publ., 1989. 340 p.
- 15 Robinson J. W. Atomic Spectroscopy. CRC Press Publ., 1996. 384 p.
- 16 Scanning Electron Microscope VEGA3. Instructions for Use. Tescan, Czech Republic, 2013. 50 p.
- 17 Goodhew P. J., Humphreys J., Beanland R. Electron Microscopy and Analysis, 3-rd Ed. CRC Press, 2000. 254 p.
- 18 Зусайлов Ю. Н., Бадеников В. Я. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та, 2005. № 4. С. 19–24.
- 19 Зусайлов Ю. Н., Бадеников В. Я. // Сб. научн. трудов Ангар. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 1, № 1. С. 76–79.
- 20 Лавренова Е. А., Жеронкина О. Г., Софронов В. Л. // Химия фтора: материалы X Всероссийской конференции, приуроченной к 100-летию со дня рождения член-корр. АН СССР Ю. В. Гагаринского / под ред. В. М. Бузник; Томский политехн. ун-т. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 50.
- 21 ГОСТ 23775–79. Изделия углеродные. Методы определения предела прочности на сжатие, изгиб, разрыв. М.: Изд. стандартов, 2018. 12 с.
- 22 ГОСТ 22692–77. Материалы углеродные. Методы определения зольности. М.: Изд-во стандартов, 2018. 3 с.
- 23 ГОСТ 22898–78. Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2018. 14 с.
- 24 ГОСТ 23776–79. Изделия углеродные. Метод измерения удельного электрического сопротивления. М.: Изд-во стандартов, 2018. 16 с.
- 25 ГОСТ Р 54237. Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. М.: Стандартиформ, 2018. 12 с.
- 26 Фетисов Г. В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007. 672 с.
- 27 Окисление и самовозгорание твердого топлива / Под ред. В. А. Сапунова. Киев: Наук. думка, 1994. 264 с.
- 28 Фенелонов В. Б. Пористый углерод. Новосибирск: Ин-т катализа СО РАН, 1995. 513 с.
- 29 Углеродные композиты. Режим доступа: <https://komposit.com.ua/index.php/home/uglyerodnyyekompozity> (дата обращения: 02.04.2019).
- 30 Тарасевич М. Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука, 1984. 253 с.