

УДК 661.481.7(661.666.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070
Шифр специальности ВАК 2.6.8; 2.6.17
Научная статья

Исследования углеродных материалов и их ресурсные испытания в качестве анодов при производстве фтора

В.Л. Софронов✉, С.А. Ткачук, А.Н. Жиганов, С.А. Житков

*Северский технологический институт – филиала Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», Россия, г. Северск*

✉ vlsufronov@mephi.ru

Аннотация. Актуальность. На сегодняшний день основным промышленным способом получения фтора является электролиз фтороводорода из расплавов гидрофторидов калия. При этом чаще всего используют среднетемпературные (до 105 °С) электролизеры с электролитом состава $KF \cdot 2HF$, рассчитанные на силу тока до 40 кА, в которых основополагающими элементами являются жалюзийный стальной катод и коксовый анод. Единственное оставшееся российское предприятие, производящее коксовые пластины, пригодные для использования в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора (АО «Донкарб Графит») с целью снижения их стоимости, стало применять вместо нефтяных каменноугольные кокс и пек, что привело к существенному снижению качества и срока их работы. Поэтому существует необходимость поиска и разработки новых более устойчивых во фторидных средах анодных материалов. **Цель.** Оценка различных новых углеродсодержащих материалов, пригодных для изготовления анодных пластин и электрохимического производства фтора, проведение ресурсных испытаний данных материалов в непрерывном режиме в течение продолжительного времени (до 3360 часов). **Методы.** Технические условия, кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электросопротивление материалов композиционных коксовых пластин определяли согласно ГОСТ 23775-79, 22692-77, 22898-78, 23776-79. **Объект.** Материалы на основе коксо-пековых соединений, углерод-углеродные композиционные материалы. **Результаты.** В условиях получения фтора проведены исследования и ресурсные испытания ряда новых композиционных материалов на основе углерода, разработанных ООО «Научно-технологический центр углеродных и композиционных материалов» (г. Челябинск) и Северским технологическим институтом – филиалом национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». При этом определены следующие физико-механические и физико-химические свойства композиционных материалов: кажущаяся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электрическое сопротивление. Сформированы рекомендации для дальнейших производственных испытаний ряда новых материалов.

Ключевые слова: фтор, коксовые пластины, композиционные материалы, пироуплотнение, технические характеристики, ресурсные испытания

Для цитирования: Исследования углеродных материалов и их ресурсные испытания в качестве анодов при производстве фтора / В.Л. Софронов, С.А. Ткачук, А.Н. Жиганов, С.А. Житков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 125–132. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070

UDC 661.481.7(661.666.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070
Scientific paper

Carbon materials and their resource tests as anodes in fluorine production

V.L. Sofronov✉, S.A. Tkachuk, A.N. Zhiganov, S.A. Zhitkov

*Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI»,
Seversk, Russian Federation*

✉ vlsufronov@mephi.ru

Abstract. Relevance. Today, the main industrial method for producing fluorine is the electrolysis of hydrogen fluoride from potassium hydrofluoride melts. Most often, they use the medium-temperature (up to 105°C) electrolyzers with a $KF \cdot 2HF$ electrolyte designed for a current of up to 40 kA, in which the fundamental elements are a louvered steel cathode and a coke anode. The only remaining Russian enterprise producing coke plates suitable for use as anodes in the electrochemical production of fluorine (JSC Donkarb Graphite) began to use coal coke and pitch instead of petroleum coke and pitch in order to reduce their cost. This led to a significant decrease in their quality and service life. Therefore, there is a need to search for and develop new anode materials that are more stable in fluoride environments. **Aim.** Evaluation of various new carbon-containing materials suitable for manufacturing anode plates and electrochemical production of fluorine, carrying out resource tests of these materials in a continuous mode for various periods of time (up to 3360 hours). **Methods.** Technical conditions, apparent density, compressive strength, ash content, porosity and specific electrical resistance of composite coke plate materials were determined according to SS 23775-79, 22692-77, 22898-78, 23776-79. **Object.** Materials based on coke-pitch compounds, carbon-carbon composite materials. **Results.** Under conditions of fluorine obtaining the authors have conducted the research and resource testing of a number of new carbon-based composite materials developed by the Scientific and Technological Center of Carbon and Composite Materials (Chelyabinsk) and the Seversk Technological Institute, a branch of the National Research Nuclear University MEPhI. They determined the following physical, mechanical and physical and chemical properties of the composite materials: apparent density, compressive strength, ash content, porosity and specific electrical resistance. The paper introduces the recommendations for further production testing of a number of new materials.

Keywords: fluorine, coke plates, composite materials, pyrocompaction, technical characteristics, resource testing

For citation: Sofronov V.L., Tkachuk S.A., Zhiganov A.N., Zhitkov S.A. Carbon materials and their resource tests as anodes in fluorine production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 125–132. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070

Введение

Фтор является одним из ключевых агентов в современной ядерной технологии, с его помощью получают один из основных продуктов ядерной технологии – гексафторид урана. В производственных условиях фтор получают среднетемпературным электролизом расплава, который образуется при насыщении дигидрофторида калия ($KF \cdot 2HF$) фтороводородом до содержания 36–43 % HF . При этом в качестве анодов используют коксовые пластины. От качества этих пластин существенно зависит производительность и продолжительность межремонтной работы фторных электролизеров, величина разности потенциалов на электролизере, последняя в свою очередь определяет скорость и степень электрохимической коррозии элементов конструкции и соответственно накопление продуктов коррозии конструкционных материалов в электролите, что также приводит к увеличению разности потенциалов на электролизере [1–4].

В России и в мире производится большое количество различных типов коксовых (угольных) пластин, которые применяют не только в технологии фтора, но и при получении алюминия и других металлов [5, 6]. Существенным недостатком угольных анодов является их склонность к поляризации, анодному эффекту, когда происходит резкий рост напряжения на электролизере (до 50–60 В) и одновременное уменьшение силы тока. Эксплуатационная стойкость анодов определяется в основном структурой и природой материала кокса нефтяного или угольного, связки – пека нефтяного или угольного, а также технологий изготовления анодов.

Для изготовления коксовых пластин как российские, так и зарубежные предприятия используют

каменноугольный или нефтяной кокс и пеки. Лучшие результаты получаются при использовании в качестве основы для анодных электродов нефтяных кокса и пека.

В работах [7–9] нами представлены результаты комплексных сравнительных исследований структуры и химического состава коксовых пластин ряда российских и зарубежных производителей с использованием различных физико-химических методов анализа (рентгеноструктурный и рентгенофазовый, термогравиметрический, спектральный и т. д.) с целью проверки возможности их использования для изготовления анодов для фторных электролизеров.

В работах показано, что по основным показателям, таким как плотность, пористость, зольность, удельное электрическое сопротивление, прочность на сжатие, коксовые пластины фирм Германии, Франции, Японии и Китая практически не отличаются от требований российского ТУ 48-12-34-95 («Пластины коксовые обожженные»), а по продолжительности межремонтного цикла в производстве фтора даже им уступают. Основными недостатками всех исследованных материалов являются их высокие пористость и удельное электрическое сопротивление.

В настоящее время российское предприятие, производящее коксовые пластины, пригодные для производства фтора (АО «Донкарб Графит»), с целью снижения их стоимости стало использовать каменноугольные кокс и пек [9], что привело к снижению их качества, поэтому актуальным является вопрос поиска и разработки новых более устойчивых во фторидных средах анодных матери-

алов с улучшенными эксплуатационными свойствами (снижение пористости и удельного электрического сопротивления, увеличение прочностных характеристик) для увеличения ресурса их работы до 15–20 тыс. часов и более.

Материалы для исследования и технологии получения

При подборе материалов для исследования исходили из следующих требований:

- 1) химическая стойкость в среде расплава электролита $KF \cdot 2HF$ и газообразных фтороводорода и фтора;
- 2) минимально возможная открытая пористость, а также более высокая, чем у пластин «Донкарб Графит», плотность, электропроводность и прочность.

Информация об исследованных материалах приведена в табл. 1. Коксовые пластины фирмы «Донкарб Графит» рассматривали для сравнения как базовый материал.

Коксовые пластины «Донкарб Графит» (пластины № 1) изготовлены по классической порошковой технологии [10, 11]. Технология включает следующие основные стадии: измельчение и классификацию материалов; первичную пропитку пеком, формование, прессование заготовок и первичный обжиг; повторную пропитку связующим, повторный обжиг и механическую обработку.

Коксовые пластины ООО «НТЦ УКМ» (пластины № 2) изготовлены по классической порошковой технологии [10, 11]. Отличие заключалось лишь в том, что для повышения физико-механических свойств пластин в качестве связующего материала кроме нефтяного пека введен стеклоглерод и 3–5 мас. % ультрадисперсной меди. Пластины были покрыты также пиролитическим углеродом.

Углерод-углеродный композиционный материал (пластина № 3) в работе получали осаждением из газовой фазы пироуглерода, образующегося при термическом разложении метана, при температуре 1100–1200 °С и армировали углеродными волокна-

ми из ткани Урал ТМ-4-22 СТБ 995-2011 производства ОАО «Светлогорскимволокно» (Республика Беларусь), затем снаружи герметизировали плотным слоем пироуглерода по технологии, разработанной в [12]. Углерод-углеродные композиционные материалы имеют высокую стойкость в агрессивных средах и повышенных температурах, а также эрозионную и радиационную стойкость.

Коксовую пластину № 4 изготовили из игольчатого нефтяного кокса – это высокоструктурированный углеродный продукт с низким содержанием металлов и серы. Он, на наш взгляд, должен придать электродам специальные свойства, такие как высокие электропроводность и прочность. В работах, посвященных совершенствованию технологии коксовых пластин [11, 12], игольчатый кокс упоминается как материал, благодаря которому должна существенно снизиться вероятность разрушения анодов в процессе электролиза при условии обеспечения основных параметров в технологии производства коксовых анодов. Углеродные волокна также используют в качестве армирующего каркаса для различных углеродных материалов. Для исследований использовали игольчатый кокс марки А производства Омского НПЗ и каменноугольный пек марки В производства ООО «Донкарб Графит».

Коксовые пластины изготовили по классической порошковой технологии. При этом игольчатый кокс измельчали и отбирали фракцию (–100) мкм, проводили его обжиг по режиму, приведенному на рис. 1, смешивали порошки кокса и пека фракций (–100) мкм в массовом соотношении 75:25, прессовали при давлении 0,5 т/см² и проводили повторную термообработку при температуре 600 °С.

Коксовую пластину № 5 изготовили из коксовой пластины ООО «Донкарб Графит» и дополнительно её армировали тканью, полученной из тонких углеродных нитей диаметром 5–10 мкм производства «Юматекс» ГК «Росатом» с последующей пропиткой каменноугольным пеком и повторным обжигом.

Таблица 1. Образцы исследуемых материалов

Table 1. Samples of the materials researched

Изготовление Manufacturing	ООО «Донкарб Графит», г. Челябинск Donkarb Graphite LLC, Chelyabinsk	ООО «НТЦ УКМ» ¹ , г. Челябинск LLC «NTC UKM» ¹ , Chelyabinsk	Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk		
№	1	2	3	4	5
Марка, основа материала Brand, material basis	«Донкарб», КПТ ^м «Donkarb», KPT ^m	УКМ-1, КПТ UKM-1, KPT	СТИ-1, пруток, ткань ТМ-4-22 СТБ 995-2011 STI-1, rod, fabric ТМ-4-22 STB 995-2011	СТИ-2, игольчатый кокс STI-2, needle coke	СТИ-3, углетканевый STI-3, carbon-fiber

Примечание: «НТЦ УКМ»¹ – Научно-технический центр. Углеродные композиционные материалы; КПТ^м – классическая порошковая технология.

Notes: «NTC UKM»¹ – Scientific and technical center. Carbon composite materials; KPT^m – classical powder technology.

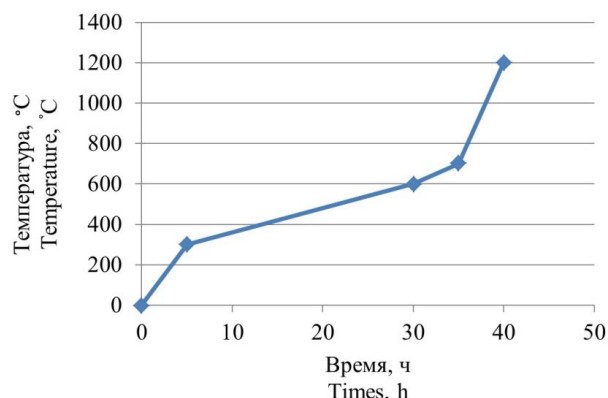


Рис. 1. Режим термообработки (обжига) коксовых пластин

Fig. 1. Heat treatment (roasting) mode of coke plates

Результаты экспериментов и обсуждение

Свойства материалов анодных пластин. Характеристики коксовых пластин (КП) установлены согласно ТУ 48-12-34-95 – Пластины коксовые обожжённые. Технические условия, кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электросопротивление материалов композиционных коксовых пластин определяли по методикам, приведенным в соответствующих государственных стандартах: ГОСТ 23775-79, 22692-77, 22898-78 и 23776-79. При этом были проанализированы не менее трех пластин каждой марки, каждый анализ повторяли не менее трех раз. В работах [13–19] для определения качества пластин предлагают использовать методы физико-механического, химического и физико-химического анализа, такие как ДТА, РСА, АЭС и СЭМ [13]. Статистическую обработку опытных данных проводили по методике, приведенной в ОСТ 95 10353-2008 – Отраслевая система обеспечения единства измерений.

Плотности пластин из композиционных материалов (№ 2, 3) выше, а пластин (№ 4, 5) ниже, чем плотность стандартных пластин (Донкарб); пористости пластин из композиционных материалов (№ 2, 3) в 3–4 раза ниже, чем пористости пластин (Донкарб) и СТИ (пластины 4 и 5); прочности на сжатие пластин

из композиционных материалов (№ 2, 3) значительно выше, чем прочности пластин (Донкарб) и СТИ (пластины 4 и 5); удельные электрические сопротивления пластин из композиционного материала СТИ-1 (пластина № 3) в 2–2,5 раза ниже, чем удельные электрические сопротивления всех остальных пластин; зольности всех пластин, за исключением пластины УКМ-1, практически одинаковы.

Таким образом, из проведенных исследований следует, что свойства рассмотренных материалов в основном достаточно близки за исключением более низкой пористости и удельного электрического сопротивления, а также более высокой прочности композиционных пластин СТИ-1. С целью оценки пригодности этих материалов для использования в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора нами были проведены ресурсные испытания.

Ресурсные испытания анодных пластин. Испытания образцов анодных композиционных материалов проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 2.

Установка состояла из десяти электролизеров, которые имели независимые подключения и управление (рис. 3). В качестве ванны электролизера использовали фторопластовый стакан с закручивающейся крышкой объемом 1000 см³, в котором плавил электролит KF·2HF, предварительно насыщенный фтороводородом, массой 1800 г. Материал катода Ст3, рабочие площади анода и катода составляли 4,1 см², межэлектродное расстояние – 45 мм. В крышке просверлены три отверстия для защитного чехла термопары, анода и катода. Вывод фтора и водорода из электролизера не предусмотрен, и газы, соответственно, поступают в общее пространство над электролитом, в котором превращаются снова во фтороводород.

Процесс электролиза проводили при температуре 95–100 °C, напряжении 5,8–8,5 В, плотности тока 0,2 А/см². Исходные содержания фтороводорода, железа и никеля в электролите по данным химических анализов соответственно составили: [HF]=41,06 %; [Fe]=0,008 %; [Ni]=0,005 мас. % [20].

Таблица 2. Технические характеристики коксовых пластин различных производителей

Table 2. Technical characteristics of coke plates from various manufacturers

Марка и № пластин Brand and plate no.	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Пористость, % Porosity, %	Зольность, % Ash content, %	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м Specific electrical resistance, μOhm·m	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa
ТУ 48-12-34-95. Пластины коксовые TU 48-12-34-95. Coke plates	не менее not less than 1,64	не более no more than 21	не более no more than 0,6	не более no more than 25-40	не менее not less than 58,8
Донкарб/Donkarb, № 1	1,65±0,01	19,3±0,3	0,37±0,01	40,0±0,2	64,9±6,9
УКМ-1/UKM-1, № 2	1,95±0,05	6,0±2,0	0,60±0,10	34,0±3,3	103,0±10,0
СТИ-1/STI-1, № 3	1,78±0,02	5,1±0,3	0,28±0,11	15,0±0,3	105,3±9,3
СТИ-2/STI-2, № 4	1,42±0,04	20,0±0,6	0,27±0,03	39,2±0,8	73,1±4,5
СТИ-3/STI-3, № 5	1,32±0,04	25,0±0,3	0,28±0,03	45,0±2,2	44,9±6,9

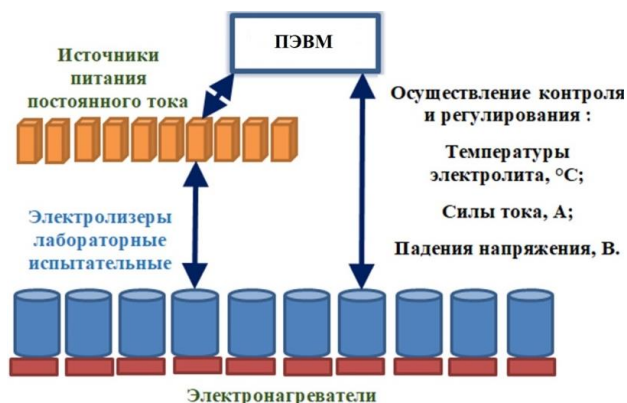


Рис. 2. Схема лабораторной установки для испытаний образцов анодных материалов

Fig. 2. Schematic diagram of a laboratory setup for testing samples of anode materials

Фторопластовые стаканы устанавливали на электроплитки, которые подогревали электролит. Регулировку температуры электролита выполняли терморегулятором ТРМ500 и димером, который ограничивает напряжение питания электроплитки. Электропитание электролизеров осуществляли источником питания постоянного тока МСН-K305D в режиме стабилизации силы тока.

Снятие анодных эффектов, возникающих при электролизе, осуществляли путем повышения напряжения питания до 50 В и тока до 4 А в течение 2 с. Методика проведения исследований процесса электролитического получения фтора и анализов исходных и конечных продуктов более подробно приведена в работе [4].

Экспериментальные данные, полученные при исследовании электролитического производства фтора, представлены в табл. 3.

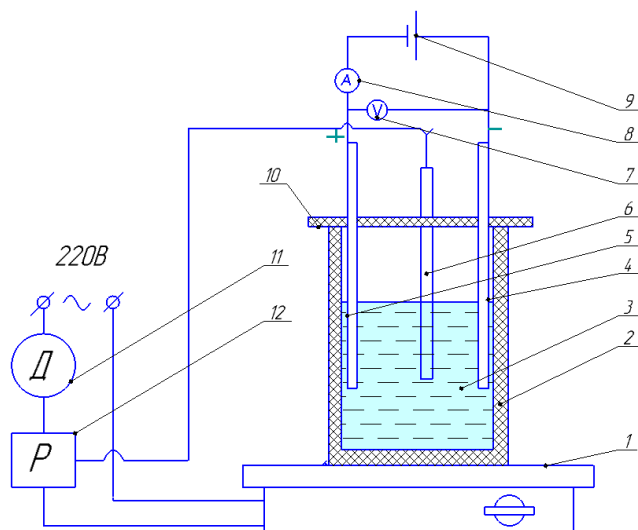


Рис. 3. Схема установки электролитического получения фтора: 1 – плитка; 2, 10 – стакан и крышка тефлоновые; 3 – электролит; 4 – катод; 5 – анод; 6 – термопара; 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – источник постоянного тока МСН-K305D; 11 – тиристорный регулятор мощности; 12 – регулятор температуры ТРМ500

Fig. 3. Schematic diagram of the electrolytic fluorine production unit: 1 – hotplate; 2, 10 – teflon glass and lid; 3 – electrolyte; 4 – cathode; 5 – anode; 6 – thermocouple; 7 – voltmeter; 8 – ammeter; 9 – DC source MSN-K305D; 11 – thyristor power regulator; 12 – TRM500 temperature regulator

Таблица 3. Результаты ресурсных испытаний образцов анодных материалов

Table 3. Results of resource tests of anode material samples

№ пластины и характеристика анода Plate no. and anode characteristics	t , ч/h	i_{ay} , А/см ² A/cm ²	$U_{вн}$, В/V	$U_{к}$, В/V	Анодные эффект, шт/pcs	Состояние анода к концу испытаний Anode condition at the end of the tests	Рекомендация для применения Recommendation for use
№ 1, 000 «Донкарб Графит» по ТУ 48-12-34-95 стандартный «Donkarb Graphite» according to TU 48-12-34-95 standard	3360	0,2	5,8	7,4	11	хорошее good condition	+
№ 2, 000 «НТЦ УКМ», г. Челябинск LLC «NTC UKM», Chelyabinsk	3360	0,2	5,8	8,5	11		+
№ 3, пруток УУКМ Ткань ТМ-4-22 СТБ 995-2011 rod UUKM Fabric TM-4-22 STB 995-2011	3360	0,2	5,8	7,4	12		+
№ 4, Анод из игольчатого кокса Needle coke anode	432	0,2	6,16	6,18	2	плохое bad condition	–
№ 5, Анод-магниева пластина с углетканевым покрытием Anode-magnesium plate with carbon fabric coating	5	0,2	6,3	6,3	–		–

Примечания: Поверхность анода № 4 стала рыхлой и осыпалась; произошло нарушение контакта между магниевой пластиной и углетканевым покрытием анода № 5.

Note: Surface of anode no. 4 became loose and crumbled; contact between the magnesium plate and the carbon fabric coating of anode no. 5 was disrupted.

Следующие образцы выдержали ресурсные испытания, которые продолжались в течение 3360 ч, наряду с образцом по ТУ 48-12-34-95 (Донкарб):

- 1) образцы из углерод-углеродного композиционного материала, уплотненные плотным слоем пироуглерода (пластина № 3, СТИ-1);
- 2) анодные коксовые композитные пластины УКМ (пластина № 2, ООО «НТЦ УКМ», г. Челябинск).

Поэтому они могут быть рекомендованы для дальнейшей проверки в производственных условиях.

Заключение

Проведены исследования технологических свойств образцов композиционных и коксовых пластин, разработанных ООО «НТЦ УКМ», (г. Челябинск) и СТИ «НИЯУ МИФИ» (г. Северск), из различных материалов, необходимых при использовании в качестве анодов в электрохимическом производстве фтора: кажущаяся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость

и удельное электросопротивление. Установлено, что свойства исследованных материалов в основном достаточно близки к свойствам базового анодного коксового материала марки «Донкарб Графит», который в настоящее время используется в производстве фтора, за исключением более низкой пористости, удельного электрического сопротивления и более высокой прочности композиционных пластин производства ООО «НТЦ УКМ», (г. Челябинск) и СТИ «НИЯУ МИФИ».

Ресурсные испытания, проведенные для оценки пригодности материалов, использованных в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора, показали, что пластины СТИ-1 (пластины № 3), изготовленные из углерод-углеродных композиционных материалов, пропитанных пироуглеродом, а также пластины УКМ (пластины № 2), изготовленные из композиционных материалов на ООО «НТЦ УКМ», можно рекомендовать для дальнейших производственных испытаний в условиях получения фтора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов В.В. Ретроспективный анализ и прогноз развития некоторых отраслей фторхимической промышленности // Online journal «Fluorine notes». – 2024. – Т. 157. – № 6. – С. 1–21. URL: http://ru.notes.fluorine1.ru/public/2024/6_2024/article_2.html (дата обращения 15.01.2025).
2. Беляев В.М. Механизм и кинетика электродных процессов при электролизе расплава $KF \cdot nHF$ // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 85–90. URL: <https://elibrary.ru/hpoptj> (дата обращения 15.01.2025).
3. Leech H.R. Laboratory and technical production of fluorine and its compounds // Quarterly Reviews, Chemical Society. – 1949. – Vol. 22. – № 3. – P. 22–35. DOI: 10.1039/QR9490300022.
4. Исследование вольт-амперных характеристик процесса получения фтора методом среднетемпературного электролиза / В.Л. Софронов, С.А. Житков, Ю.Н. Макаеев, С.А. Ткачук // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2024. – № 36. – С. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/36/6>.
5. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства / В.П. Твердохлебова, С.А. Храменко, Ф.А. Бурюшкина, И.В. Павлова // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 369–386. URL: <https://elibrary.ru/neusxv> (дата обращения 15.01.2025).
6. Влияние свойств нефтяного кокса на эксплуатационные характеристики обожженных анодов для производства алюминия / А.Г. Золотова, В.Ф. Петрова, И.В. Карташова, Д.М. Вдовенко // Известия Волгоградского государственного технического института. – 2023. – Т. 281. – № 10. – С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-33-39>.
7. Сырьевая база и перспективы производства фтора в России / В.Л. Софронов, О.Г. Жеронкина, К.В. Холина и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 114–123. URL: <https://elibrary.ru/qzxiqh> (дата обращения 15.01.2025).
8. Софронов В.Л., Полянская А.В., Молоков П.Б. Анализ углеродных материалов, используемых в качестве анодов в производстве фтора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/202>.
9. Софронов В.Л., Буйновский А.С., Дамм Ю.П. Исследование свойств коксовых пластин марок «ВХК» и «Донкарб» // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – Т. 27. – № 4. – С. 392–405. DOI: 10.15372/KhUR2019151.
10. Способ изготовления коксовых пластин: пат. № 2108967, Российская Федерация, С1; заявл. 22.11.1995; опубл. 20.04.1998. – 5 с.
11. Черкина П.П., Кириченко Т.В. Анализ конкурентной среды рынка нефтяного игольчатого кокса в России и за рубежом // Сборник научных трудов III Межвузовской научно-практической конференции ученых, специалистов и студентов, посвященной празднованию Дня рождения факультета комплексной безопасности ТЭК в Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина. – М.: Перспектива, 2022. – С. 239–248. URL: <https://elibrary.ru/uclbwl> (дата обращения 15.01.2025).
12. Газофазное уплотнение углерод-углеродных композиционных материалов в установках с радиально движущейся зоной пиролиза / А.Ф. Ильющенко, М.А. Андреев, О.А. Прохоров, А.Н. Суворов // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – 2021. – Т. 44. – С. 155–164. URL: <https://elibrary.ru/htidpi> (дата обращения 15.01.2025).
13. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. Electron microscopy and analysis. 3rd ed. – New York: CRC Press, 2000. – 254 p.
14. Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – Vol. 5. – № 8. – P. 546–568.

15. Nakajima T. Fluorine-carbon and fluoride-carbon materials: chemistry, physics, and applications // Library of Congress cataloging-in-publication data / Ed. by T. Nakajima. – New York: CRC Press, 2001. – 416 p.
16. Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine // Journal of the Electrochemical Society of Japan. – 1961. – Vol. 29. – № 3. – P. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.5796/jesj.29.3.E180>.
17. Neumark H. Electrolytic fluorine production in Germany // Journal of the Electrochemical Society – 1947. – Vol. 91. – P. 367–385. DOI: [10.1149/1.3071789](https://doi.org/10.1149/1.3071789)
18. Role of the surface properties of carbon anodes in the electrolytic preparation of fluorine / F. Lantelme, H. Groult, C. Belhomme, B. Morel, F. Nicolas // Journal of New Materials for Electrochemical Systems. – 2006. – Vol. 9. – № 3. – P. 283–290.
19. Roesky H.W. Efficient preparation of fluorine compounds // A comprehensive guide to creating fluorine-based compounds and materials of the future / Ed. by H.W. Roesky. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. – 460 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118409466>.
20. Зусайлов Ю.Н. Контроль качества продукции в производствах угольных анодов, фтора и гексафторида урана. – Ангарск: Ангарский государственный технический университет, 2017. – 267 с.

Информация об авторах

Владимир Леонидович Софронов, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; vlsofronov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9513-8412>

Семён Александрович Ткачук, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и атомных производств Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; semenaleksandrovih@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8642-7413>

Александр Николаевич Жиганов, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; ANZhiganov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0003-5998-7727>

Сергей Александрович Житков, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; zhisa47@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9158-1011>

Поступила в редакцию: 24.03.2025

Поступила после рецензирования: 30.04.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Kornilov V.V. Retrospective analysis and forecast of development of some branches of fluorochemical industry. *Online journal «Fluorine notes»*, 2024, vol. 157, no. 6, pp. 1–21. Available at: http://ru.notes.fluorine1.ru/public/2024/6_2024/article_2.html (accessed 15 January 2025).
2. Belyaev V.M. Mechanism and kinetics of electrode processes in electrolysis of $\text{KF} \cdot n\text{HF}$ melt. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 85–90. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/hpoptj> (accessed 15 January 2025).
3. Leech H.R. Laboratory and technical production of fluorine and its compounds. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, 1949, vol. 22, no. 3, pp. 22–35. DOI: [10.1039/QR9490300022](https://doi.org/10.1039/QR9490300022).
4. Sofronov V.L., Zhitkov S.A., Makaseev Yu.N., Tkachuk S.A. Study of the volt-ampere characteristics of the process of obtaining fluorine by medium-temperature electrolysis. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, 2024, no. 36, pp. 81–89. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/36/6>.
5. Tverdokhlebova V.P., Khramenko S.A., Buryushkina F.A., Pavlova I.V. Petroleum coke for the aluminum industry. Technology and properties. *Journal of the Siberian Federal University. Chemistry*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 369–386. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/neusxv>
6. Zolotova A.G., Petrova V.F., Kartashova I.V., Vdovenko D.M. Influence of petroleum coke properties on the performance characteristics of baked anodes for aluminum production. *Bulletin of the Volgograd State Technical Institute*, 2023, vol. 281, no. 10, pp. 33–39. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-33-39>.
7. Sofronov V.L., Zheronkina O.G., Kholina K.V. Raw material base and prospects for fluorine production in Russia. *Bulletin of higher educational institutions. Physics*, 2013, vol. 56, no. 4/2, pp. 114–123. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/qzxiplh> (accessed 15 January 2025).
8. Sofronov V.L., Polyanskaya A.V., Molokov P.B. Analysis of carbon materials used as anodes in fluorine production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 78–88. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/202>.
9. Sofronov V.L., Buinovskiy A.S., Damm Yu.P. Study of properties of coke plates of the VKhK and Donkarb brands. *Chemistry for Sustainable Development*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 392–405. (In Russ.) DOI: [10.15372/KhUR2019151](https://doi.org/10.15372/KhUR2019151).
10. Zusaylov Yu.N., Koryuchkin V.N. *Method for manufacturing coke plates*. Patent RF, no. 2108967, 1998. (In Russ.)

11. Cherkina P.P., Kirichenko T.V. Analysis of the competitive environment of the petroleum needle coke market in Russia and abroad. *Collection of scientific papers of the III Interuniversity scientific and practical conference of scientists, specialists and students dedicated to the celebration of the birthday of the faculty of integrated safety of the fuel and energy complex at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. Moscow, Perspektiva of Russia Publ., 2022. pp. 239–248. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/uclbwl> (accessed 15 January 2025).
12. Ilyushchenko A.F., Andreev M.A., Prokhorov O.A., Suvorov A.N. Gas-phase compaction of carbon-carbon composite materials in installations with a radially moving pyrolysis zone. *Powder metallurgy. Republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, 2021. pp. 155–164. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/htidpi> (accessed 15 January 2025).
13. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. *Electron microscopy and analysis*. 3rd ed. New York, CRC Press, 2000. 254 p.
14. Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 5, no. 8, pp. 546–568. (In Russ.)
15. Nakajima T. Fluorine-carbon and fluoride-carbon materials: chemistry, physics, and applications. *Library of Congress cataloging-in-publication data*. Eds. T. Nakajima. New York, CRC Press, 2001. 416 p.
16. Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine. *Journal of the Electrochemical Society of Japan*, 1961, vol. 29, no. 3, pp. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.5796/jesj.29.3.E180>.
17. Neumark H. Electrolytic fluorine production in Germany. *Journal of the Electrochemical Society*, 1947, vol. 91, pp. 367–385. DOI: [10.1149/1.3071789](https://doi.org/10.1149/1.3071789).
18. Lantelme F., Groult H., Belhomme C., Morel B., Nicolas F. Role of the surface properties of carbon anodes in the electrolytic preparation of fluorine. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 283–290.
19. Roesky H.W. Efficient preparation of fluorine compounds. *A comprehensive guide to creating fluorine-based compounds and materials of the future*. Eds. H.W. Roesky. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2012. 460 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118409466>.
20. Zusailov Yu.N. *Quality control of products in the production of carbon anodes, fluorine and uranium hexafluoride*. Angarsk, Angarsk State Technical University Publ., 2017. 267 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir L. Sofronov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; vsofronov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9513-8412>

Semen A. Tkachuk, Lecturer, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; semenaleksandroviht@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8642-7413>

Aleksandr N. Zhiganov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; ANZhiganov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0003-5998-7727>

Sergey A. Zhitkov, Cand Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; zhsa47@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9158-1011>

Received: 24.03.2025

Revised: 30.04.2025

Accepted: 16.06.2025