

Список использованной литературы:

- 1 Об утверждении Государственной программы "Цифровой Казахстан" Постановление Правительства Республики Казахстан от 12 декабря 2017 года № 827.
- 2 Байбородова Л. В. Практико-ориентированный подход к подготовке будущих педагогов [Электронный ресурс] // Ярославский педагогический вестник. 2015. № 1. Т. 2. URL: http://vestnik.yspu.org/releases/2015_1pp/13.pdf (дата обращения: 11.01.2016).
- 3 Mazhitova L., Syzdykova R., Imanbaeva A. Practice-oriented model of training students in physics at a technical university. GIREP-ICPE-EPEC-MPTL CONFERENCE 2019, Programme and Book of Abstracts. Budapest, 1-5 July, 2019.-P. 776-777
- 4 Молдабекова М.С., Жаврин Ю.И., Поярков И.В., Мукамеденкызы В. Внедрение научных методов исследований в специальный физический практикум – основа формирования профессиональных компетентностей студентов // Физическое образование в вузах. Т.19, № 2, 2013, С. 110-114. (Издательский Дом Московского Физического общества).
- 5 Кожамкулов Б.А., Молдабекова М.С., Битибаева Ж.М. К изучению некоторых вопросов взаимодействия электронов с композитными материалами // Вестник КазНПУ им.Абая, -2015. №2.- С.152-157.
- 6 Ковязина И.В., Пилипец Л.В. Эмоциональная активация решения учебных задач при обучении физике // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-1. – С. 145-149
- 7 Образовательная программа по специальности «5В011000 - Физика». КазНПУ имени Абая, Алматы 2018.

МРНТИ 44.41.29:45.09.31
УДК 539.21:536.49

DOI: <https://doi.org/10.51889/2020-1.1728-7901.45>

С. Опахай¹, К.А. Кутербекоев¹, С.А. Нуркенов¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан

ТІРЕУІШ МЕТАЛЛ НЕГІЗІНДЕГІ ҚАТТЫ ОКСИДТІ ОТЫН ЭЛЕМЕНТТЕРІ

Аңдатпа

Осы қысқаша шолу мақалада қатты оксидті отын элементтерінің барлық буыны егжей-тегжейлі талқыланды. Әсіресе, металл негізіндегі қатты оксидті отын элементтеріне ерекше көңіл бөлінді. Металл негізі бар конструкциялар тез іске қосылуы, сенімді, механикалық тұрақтылығы және термоциклдеуге төзімділіктің арқасында жоғары қызығушылық тудырады. Ni, Fe Ni, NiCrAlY және ферритті тот баспайтын болат негізіндегі металл тіреуіштерінің артықшылықтары мен кемшіліктері егжей-тегжейлі талқыланды. Шолудың өзектілігі болып табылатын аталған мәселе бойынша әлемнің жетекші ғалымдарының жұмысына талдау жасалды.

Осы талдаулардың негізінде қазіргі уақытта Ni-Al тасымалдаушы негізіндегі қатты оксидті отын элементтері әлемдегі ең перспективті және экономикалық тиімді болып табылатынын атауға болады.

Түйін сөздер: қатты оксидті отын элементтері (ҚООЭ), катод, анод, электролит, электрод, металл негізі, тот баспайтын болат, қорытпалар.

Аннотация

С. Опахай¹, К.А. Кутербекоев¹, С.А. Нуркенов¹

¹Евразийский национальный университет Л.Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан

ТВЕРДОКСИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА НЕСУЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

В обзорной статье подробно рассмотрены все поколения твердооксидного топливного элемента. Особенно внимание уделили твердооксидного топливного элемента на несущей металлической основе. Конструкции с металлической основой представляют повышенный интерес, благодаря возможности быстрого запуска, большей надежности, механической стабильности и стойкости к термоциклированию. Детально обсуждалось преимущества и недостатки металлические опоры на основе Ni, FeNi, NiCrAlY и ферритную нержавеющую сталь. Проведены анализы работы ведущих ученых мира по этой теме исследования.

На основании этих анализов важно отметить что в настоящее время твердооксидные топливные элементы на несущей Ni-Al основе является самой перспективной и экономической эффективной в мире.

Ключевые слова: твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), катод, анод, электролит, электрод, металлическая основа, нержавеющие стали, сплав.

Abstract

SOLID OXIDE FUEL CELLS BASED ON A METAL CARRIER

Opakhai S.¹, Kuterbekov K.A.¹, Nurkenov S.A.¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian national University, Nur-sultan, Kazakhstan

In this short review article, all generations of solid oxide fuel cells are discussed in detail. Special attention was paid to solid oxide fuel cells on a supporting metal base. Structures with a metal base are of great interest due to the possibility of quick start, greater reliability, mechanical stability and resistance to thermal cycling. The advantages and disadvantages of metal supports based on Ni, FeNi, NiCrAlY and ferritic stainless steel were discussed in detail. The analysis of the work of leading scientists of the world on this topic research.

Based on these analyzes, it is important to note that at present, solid oxide fuel cells based on a Ni-Al carrier is the most promising and economically efficient in the world.

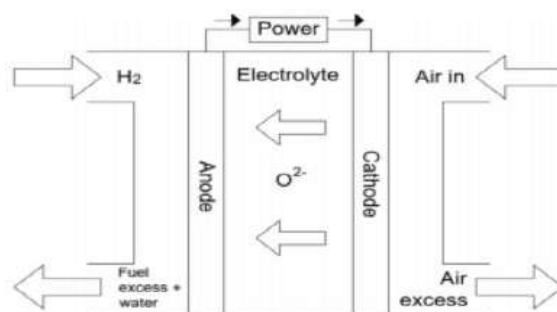
Keywords: Solid oxide fuel cells (SOFC), cathode, anode, electrolyte, electrode, metal base, stainless steels, alloy.

1. Кіріспе

Қатты оксидті отын элементтері (ҚООЭ) энергияны электрохимиялық түрлендіруге арналған өте перспективалы құрылғылар болып табылады, өйткені олар жоғары тиімділікке ие және қоршаған ортаға зиянын тигізетін ластанушы заттарды өте аз мөлшерде шығарады [1].

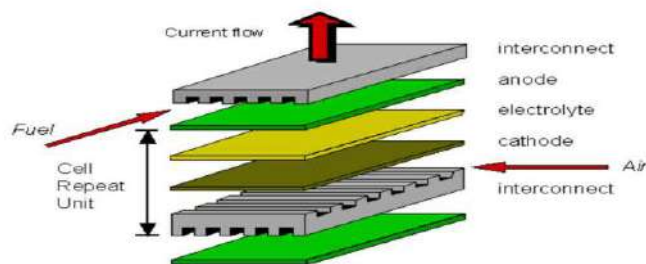
Отын элементтерінің әр түрлі типтерінің арасында ҚООЭ энергияны түрлендірудің жоғары тиімділігі, отын икемділігі, пайдаланылған жылудың жоғары сапасы, толық қатты құрылымы, жоғары қуаты, тығыздығы, парниктік газдардың төмен шығарындылары, шу деңгейінің төмендігі және қоршаған ортаға әсерінің аздығы сияқты бірнеше аспектілерінің арқасында ерекшеленеді.

ҚООЭ электродтардан (анод, катод) және электролиттен тұрады. Анод отынды қабылдайды, катод - тотықтырғыш, ал электролит өз бойынан оксидті иондарды немесе протондарды өткізеді [2]. 1 суретте оттегін өткізетін және сутекпен жұмыс жасайтын электролиті бар ҚООЭ-нің жалпы сипаттамаларын бейнеленді.



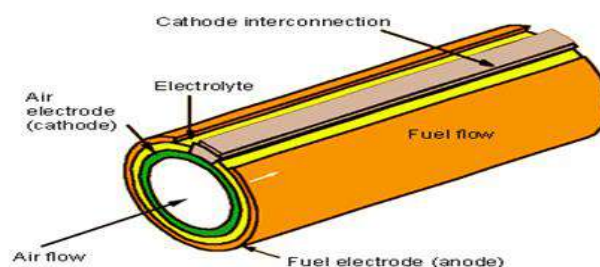
Сурет 1. Қатты оксидті отын элементінің жұмыс істеу принципі

Қазіргі таңда ұяшықтық құрылым тұрғысынан ҚООЭ екі түрі бар: жалпақ және түтік тәрізді. Жалпақ ҚООЭ үшін әрбір ұяшық жалпақ диск, шаршы немесе тік бұрышты пластина түрінде жасалған. Ұяшықтар тізбектеліп орналасқан және 2-суретте схемалық түрде көрсетілгендей жалғау пластиналарымен қосылған.



Сурет 2. Қатты оксидті отын элементінің жалпақ құрылымының схемасы

Түтікті ҚООЭ үшін әдетте электрод (катод немесе анод) кеуекті қабырғасы бар ұзын түтікше түрінде жасалған. Электродты түтіктің сыртында электролит, содан кейін тағы бір электрод бар. Ұяшықтар 3-суретте көрсетілгендей тізбектей қосылған.



Сурет 3. Қатты оксидті отын элементінің түтікші құрылымының схемасы

Бүгінде әлемде өнімділігі айтарлықтай жақсарған жазық ҚООЭ екі буыны зерттелді: алдымен электролит негізіндегі ҚООЭ (ES-SOFC), содан кейін электрод, оның ішінде анод негізіндегі ҚООЭ (AS-SOFC). Бірақ ҚООЭ жоғарыдағы аталған дәстүрлі технологияларын табысты коммерцияландыруға көптеген себептер кедергі келтіруде, мысалы; шикізатпен байланысты жоғары құн, ұяшықтың әлсіз герметизациялануы, ұяшықтардың жоғары жылулық процестер кезіндегі тұрақсыздығы, механикалық соққылардан немесе анодтың тотығуынан кернеудің ұяшыққа шектеулі мөлшерде келуі және ірі, күрделі керамикалық бөлшектердің көп мөлшерін алуға байланысты өндірістік мәселелер [3].

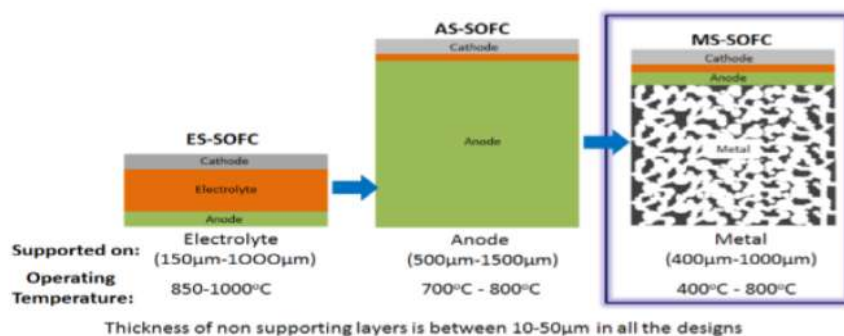
2. Талқылау

ҚООЭ үлгісін одан әрі дамыту «металды ҚООЭ» (MS-SOFC) деп аталатын үшінші буынының пайда болуына әкелді. MS-SOFC - бұл ҚООЭ қазіргі таңдағы өте қарқынды дамып келе жатқан түрі және ол жоғарыда аталған мәселелерді шешуге толық мүмкіндігі бар коммерцияландыруға перспективті үміткер болып табылады [4].

4-суретте ҚООЭ әртүрлі буындарының салыстырмалы сипаттамалары келтірілген. ES-SOFC жағдайында электродтардың жұқа қабаттарының (~50 мкм) механикалық тіреуіші болып саналатын Y_2O_3 тұрақтандырылған ZrO_2 (YSZ) электролиті қалың (>150 мкм) қабаттан жасалған. ҚООЭ үшін омдық поляризациялану құбылысы электролиттің қалыңдығымен байланысты. 4-суреттен көрініп тұрғандай ES-SOFC үшін электролиттің қалыңдығы жоғары болғандықтан оның меншікті кедергісі де арта түседі.

Электролиттің меншікті кедергісі жұмыс температурасын арттыру арқылы азайтылуы мүмкін, себебі ҚООЭ типтік электролиттік өткізгіштігі Аррениус тәуелділікті температураны көрсетеді. Сондықтан бұл ұяшықтар электролиттің (~20 Ом·см²) жеткілікті төмен үлес кедергісіне жету үшін ~1000°C жоғары температурада пайдаланылады.

ҚООЭ келесі буыны анод негізіндегі ҚООЭ (AS-SOFC). Аталған буын үшін дәстүрлі анодты ұяшықтар қалың тіреуіш қабаттан жасалды және ол берік механикалық құрылымға әкеледі деп болжанды (сурет 4).



Сурет 4. ҚООЭ әртүрлі буындарының салыстырмалы сипаттамалары

Алайда анод қабаты тотығу-тотықсыздану реакциясы кезінде сынуға және бүлінуге бейім болып келетін қымбат керамикалық немесе борпылдақ материалдан жасалды. Қарапайым анодтық тіреуіш қабаты температураның жылдам өзгерісіне ұшыраған кезде термиялық соққыларға қарсылығы төмендейді және ұяшықтарда жарықтар пайда болады. Сонымен қатар, Ni-YSZ негізіндегі ұяшықтар тотығу-тотықсыздану реакциясы жүргенде, тіпті баяу қыздырған кезде де керамикалық құрылымының өзгерісіне байланысты тезірек істен шығады [5].

ҚООЭ үшін металл тіреуіштерді (MS-SOFC) пайдалану жоғарыдағы мәселелерді толықтай шешеді және арзан болып табылады (сурет 4). Қазіргі таңда металл тіреуіші негізіндегі құрылымдар тірек негізі ретінде керамикалық электродтар немесе электролиттер қолданылатын ҚООЭ салыстырғанда тез іске қосу, толық сенімділік, механикалық тұрақтылық, жылу цикліне төзімділігінің жоғарылығы сияқты маңызды факторларымен үлкен қызығушылық тудыруда. Сонымен қатар отын элементтерінің құны тірек қызметі ретінде кеуекті металл пластиналарын қолданған кезде төмендеуі мүмкін, мұнда электрод немесе электролиттер жұқа пленка түрінде орналастырылады. Көптеген жағдайларда ҚООЭ металл тіреуіштері ретінде тот баспайтын болаттар қолданылады, себебі олардың жылулық кеңею коэффициенттері (ЖКК) отын элементтері компоненттерінің ЖКК жақын және тотығуға тұрақты болады [6].

3. Жұмыстарды талдау

Уақыт өте келе ҚООЭ үшін металл тіреуіші ретінде бірнеше металдар тобы іріктелді. Оларды іріктеудің критерийлері төмендегідей болды:

1. Қыздыру және салқындату кезінде басқа ҚООЭ материалдарымен үйлесімділігі
2. Тотығуға жоғары төзімділігі.
3. Термоциклденуге жоғары тұрақтылығы.
4. Жоғары электр өткізгіштігі.
5. Материалдар құны

Жоғарыдағы критерийлер бойынша таңдалған металдар құрамына Ni, FeNi, FeCr, NiCrAlY және ферритті тот баспайтын болат кіреді. Tucker және бірлескен авторлардың [7] ойынша FeCr негізіндегі тот баспайтын болаттар металл тіреуіші ретінде құнының төмендігі, жоғары температуралық тотығуға төзімділігі және YSZ-ге ұқсас ЖКК болуымен байланысты қолданылады. Cr ферритті тот баспайтын болат құрамында әдетте 10,5-26% аралығында болады. Төменде 1-кестеде тот баспайтын болаттардың бірі болып саналатын UNS 430 және UNS 440 құрамындағы элементтерінің пайыздық үлесі көрсетілген.

Хіа және бірлескен авторлар [8] өз жұмыстарында MS-SOFC тіреуіші ретінде тот баспайтын SS-430L болатын қолданды, нәтижесінде отын элементінің максималды қуат тығыздығы 700°C температурада 246 МВт/см² болды. Сол сияқты келесі автордың жұмысында хромның белгілі бір мөлшерде тотығуы SS-430L құрылымының бүлінуіне және электрлік тізбектің ажыратылуына әкелуі мүмкін екені баяндалған.

Кесте 1. ҚООЭ үшін металл тіреуіші ретінде қолданылатын тот баспайтын болат компоненттерінің құрамы

Элемент	Салмақтық пайыз	
	430 тот баспайтын болат (%)	440 тот баспайтын болат (%)
Cr	16-18	16-18
Mn	<1	<1
Si	<1	<1
P	<0.04	<0.04
S	<0.03	<0.03
C	0.12	0,95-1.2
Mo	-	0.75
Fe	қалдық	қалдық

[9] жұмыста Такер катод жағындағы (ауа қатысында) тот баспайтын SS-430L болатының 1200 сағаттық жұмысы кезінде хром торшасының қалыңдығы шамамен 0,9 мкм болатындығын анықтаған. Ферритті тот баспайтын болаттың тағы бір мәселесінің бірі – оның құрамында кремний мен алюминийдің болуы. Аталған екі элемент те жұмыс кезінде электр өткізбейтін оксидтер түзуі мүмкін.

Бұған дейін белгілі болғандай тот баспайтын болат құрамындағы кремнийдің мөлшері 0,017% болса да тотығуға ұшырайды.

Тот баспайтын SS-430L болаты сияқты Fr-Cr негізіндегі басқа да қорытпалар, мысалы Crofer 22APU және 22H металл тіреуіші ретінде қолданылды. Олардың құрамындағы хромның массалық үлесі 20-24% аралығында болғандықтан тотығуға төзімділігі жоғары болады. 800°C температурада ауаның 200 сағаттық әсері кезінде Crofer 22 APU қорытпасының (0,02-0,03 Ом.см²) меншікті кедергісінің ауданы жоғарыдағы температурада ауаның 30 сағаттық әсері кезінде тот баспайтын SS-430L (0,1 Ом.см²) болатының меншікті кедергісінің ауданымен салыстырғанда төмен болды [10]. Сараскета-Забала және бірлескен авторлар 800°C температурада 50% ылғалдандырылған сутегі жағдайында Crofer 22 APU қорытпасының тотығуын зерттеді. Олар хром қағы қалыңдығының өсу қарқыны алғашқы 500 сағатта байқалатынын, ал одан кейін 4500 сағатқа дейін оның мөлшері баяулай түсетінін байқаған. 3000 сағат ішінде хром қағының қалыңдығының мөлшері небәрі 1,6 мкм болған [11].

Жоғарыдағы материалдардың елеулі кемшілігі олардың құрамында хромның болуы яғни ол ҚООЭ (800°C жуық) жұмыс температурасы кезінде отындық ұяшықты ұзақ пайдалану нәтижесінде анодты бұзатын және оның электрохимиялық сипаттамаларын нашарлататын Cr₂O₃ типті қосылысын түзуі болып табылады. Қазіргі таңда жоғарыдағы қарастырылған темір негізіндегі материалдардан басқа көптеген дүниежүзіндегі зерттеулер никель негізіндегі материалдарға да шоғырланған. Жоғары температура жағдайында металл негізіндегі Fr, Cr сияқты элементтер анод құрамындағы Ni әрекеттесіп, нәтижесінде никельдің каталитикалық активтілігі төмендейді. Бұл мәселені шешу үшін металл негізі мен анод арасына диффузиялық тосқауыл қабатын орналастырады. Хромның никельмен әрекеттесуін болдыртпаудың келесі әдісі Ni негізіндегі Ni-Fe немесе Ni-Al сияқты биметалды қосылыстарды дайындау болып табылады [12].

[13] жұмыста иттриймен тұрақтандырылған цирконий диоксиді (YSZ) электролитімен Ni-Al тіреуіші негізіндегі ҚООЭ зерттелді. Алайда Ni-Al ЖКК (800°C температурада $\sim 15 \times 10^{-6}$ K⁻¹) YSZ электролитінің ЖКК ($10.7-11 \times 10^{-6}$ K⁻¹) салыстырғанда әлдеқайда жоғары болады. Ni-Al ЖКК төмендету үшін материал құрамына төмен ЖКК бар затты қосады. [14] жұмыста Ni-Al қоспа ретінде келесідей керамикалық заттарды қолданды: ZrO₂, ZrO₂ – SiO₂, Al₂TiO₅, Al₂O₃ және анықталмаған XO₂. Нәтижесінде 35-40% инертті XO₂ оксидінің қоспасы алынған композиттің ЖКК 12×10^{-6} K⁻¹ дейін төмендететіні анықталды.

[15] жұмыста алынған Ni-Al-CGO материалының құрылымы мен жылулық жарылыс параметрлеріне гадолиниймен бүркілген церий оксиді (Ce_{0.9}Gd_{0.1}O₂ или CGO) қоспасының әсері зерттелді. CGO өзінің жоғары ионды өткізгіштігінің арқасында (YSZ үшін $4.37 \cdot 10^{-3}$ См/м өткізгіштігімен салыстырғанда 500°C температурада $9.50 \cdot 10^{-3}$ См/м) 700°C төмен температурада жұмыс істейтін ҚООЭ электролиті ретінде қарастырылады. Жоғары ионды өткізгіштіктен басқа CeO₂ негізіндегі қатты электролиттер бөлме температурасынан бастап балқу температурасына дейінгі аралықта фазалық ауысулардың болмауымен сипатталады.

Көмірсутекті отындардың тікелей тотығуы мен электродтық материалдардың химиялық тұрақтылығына қатысты каталитикалық белсенділік оларды орташа температурадағы (600-700°C) қатты оксидті отын элементтеріне қолдану мүмкіншілігін анықтайды. Ni-Al металл тіреуіші негізіндегі ҚООЭ CGO қоспасын қосу оның ЖКК төмендетіп қана қоймай, Ni/CGO анодының және CGO электролитінің металл негізімен адгезиясын ҚООЭ өндіру кезеңінде де, оларды пайдалану кезеңінде де жақсартады.

4. Қорытынды

Жоғарыдағы қысқаша шолу мақалада ҚООЭ үш буыны жеке-жеке салыстырылды, нәтижесінде қазіргі таңда металл тасымалдаушы негізіндегі қатты оксидті отын элементтері (MS-SOFC) сутегі энергетикасының перспективті электрохимиялық құрылғысы болатындығы анықталды. Олар керамикалық электродтар немесе электролиттерді тіреуіш ретінде пайдаланатын ҚООЭ салыстырғанда жылдам іске қосу, үлкен сенімділік, механикалық тұрақтылық, жылу циклына төзімділігі арқасында үлкен қызығушылық тудырады.

Тіреуіш металл негізі отын ұяшығына керамикалық тіреуішті электродтағы немесе электролиттегі ұяшықтармен салыстырғанда үлкен механикалық беріктікті қамтамасыз етуге қабілетті, осыған байланысты мұндай құрылым мобильді автономды энергия қондырғыларында қолдану үшін маңызды болып табылады. Шолуда осы тақырып бойынша (металл тіреуіші негізі) әлемдегі жетекші ғалымдардың жұмыстары жан-жақты талқыланды.

Олардың жұмыстарын салыстыра отырып қазіргі таңда металл тіреуіші негізіндегі ҚООЭ арасында ең перспективтісі Ni-Al негізіндегі ҚООЭ екендігі айқындалды. Себебі Ni-Al металл тіреуіші негізіндегі ҚООЭ диффузиялық тосқауыл қабат CGO қоспасын қосу оның ЖКК төмендетіп қана қоймай, Ni/CGO анодының және CGO электролитінің металл негізімен адгезиясын ҚООЭ өндіру кезеңінде де, оларды пайдалану кезеңінде де жақсартады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

- 1 Badwal S.P. Review of progress in high temperature solid oxide fuel cells / S.P Badwal, S. Giddey, C. Munnings, A. Kulkarni // *J. Aust. Ceram. Soc.* - 2014. - Vol. 50. - P.23–37.
- 2 Mahmud L.S. Challenges in fabricating planar solid oxide fuel cells: a review / L.S Mahmud A. Muchtar, M.R Somalu // *Renew Sustain Energy Rev.* - 2017. - Vol.72(C). - P.105-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.019>
- 3 Mahato N. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review / N. Mahato, A. Banerjee, A. Gupta, S. Omar, & K. Balani // *Progress in Materials Science.* - 2015. - Vol.72. - P.141–337. DOI:10.1016/j.pmatsci.2015.01.001
- 4 Bove R. Solid Oxide Fuel Cells: Principles, Designs and State-of-the-Art in Industries / R. Bove // *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology.* - 2007. - P.267-285
- 5 Joshi A.V. Solid Electrolyte Materials, Devices, and Applications / A.V Joshi, J.J Stepan, D.M Taylor, and S Elangovan // *Journal of Electroceramics.* - 2004. - Vol.13. - P.619-625
- 6 Williams M.C. Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals to Systems / M.C Williams // *Fuel Cells.* - 2007. - №1. - P.78-85.
- 7 Tucker M.C. Progress in metal-supported solid oxide fuel cells: A review / M.C Tucker // *J.Power Sources.* - 2010. - Vol.195. - P.4570-4582. DOI:10.1016/j.jpowsour.2010.02.035.
- 8 Xia C. Development of three-layer intermediate temperature solid oxide fuel cells with direct stainless steel based anodes / C. Xia, Z. Liu, B. Liu, D. Ding, Z. Jiang // *Int J Hydrogen Energy.* - 2012. - Vol.37. - P.4401-4405. DOI:10.1016/j.ijhydene.2011.11.115.
- 9 Tucker M.C Stability and robustness of metal supported SOFCs / M.C Tucker, G.Y Lau, C.P Jacobson, L.C De Jonghe and S.J Visco // *Journal of Power Sources.* - 2008. - Vol.175. - P.447–451.
- 10 Molin S. Evaluation of porous 430L stainless steel for SOFC operation at intermediate temperatures / S. Molin, B. Kusz, M. Gazda, P. Jasinski // *J.Power Sources.* - 2008. - Vol.181. - P.31-37. DOI:10.1016/j.jpowsour.2007.10.009
- 11 Sarasketa-Zabala E. High temperature stability of porous metal substrates under highly humidified hydrogen conditions for metal supported Solid Oxide Fuel Cells / E. Sarasketa-Zabala, L. Otaegi, L.M Rodriguez-Martinez, M.A Alvarez, N. Burgos, F. Castro et.al // *Solid State Ionics.* - 2012. - Vol. 141. - P.16-18
- 12 Sadykov V.A. Design of Medium-Temperature Solid Oxide Fuel Cells on Porous Supports of Deformation Strengthened Ni-Al Alloy / V.A Sadykov, V.V Usoltsev, Yu.E Fedorova, V.A Sobyenin, A.N Salanov, P.V Kalinin, A.V Arzhannikov, A.Yu Lasso, M.B Korobeinikov, A.A Bryazgin, M.R Predtechenskii, O.F Bobrenok, A.S Ulikhin, N.F Uvarov, O.L Smorygo, A.F Il'yushchenko, V.Yu Ul'yanitskii, S.B Zlobin // *Russ. J. Electrochem.* - 2011. - Vol.47. - P.488-493. DOI:10.1134/S1023193511040148
- 13 Solovyev A.A. Solid Oxide Fuel Cell with Ni-Al Support / A.A Solovyev, S.V Rabotkin, A.V Shipilova, A.I Kiryashkin, I.V Ionov, A.N Kovalchuk, A.S Maznoy, V.D Kitler, A.O Borduleva // *Int.J.Hydrogen Energy.* - 2015. - Vol.40. - P. 14077-14084. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.151>
- 14 Windes W.E A Low CTE Intermetallic Bipolar Plate / W.E Windes, L.D Zuck, E.L Shaber, A.E Erickson, P.A Lessing // *Proceedings of the Electrochemical Society.* - 2003. - Vol.7. - P.879-887. DOI:10.1149/200307.0879PV
- 15 Kharton V.V. Transport Properties of Solid Oxide Electrolyte Ceramics: a Brief Review / V.V Kharton, F.M Marques, A. Atkinson // *Solid State Ionics.* - 2004. - Vol.174. - P.135-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.06.015>