

Ол.Д. Золотаренко ^{1,2}, М.Н. Уалханова ⁵, О.П. Рудакова ^{1,2}, Н.Е. Аханова ^{4,5},
 Ан.Д. Золотаренко ^{1,2}, Д.В. Щур ¹, М.Т. Габдуллин ⁴, Н.А. Гаврилюк ²,
 О.Д. Золотаренко ¹, М.В. Чимбай ^{1,2}, І.В. Загорулько ³, О.О. Гаврилюк ²

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОСТРУКТУР

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України
 вул. Кржижановського, 3, 03142, Київ, Україна

²Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
 вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, E-mail: o.d.zolotareenko@gmail.com

³Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України
 бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна

⁴Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
 Толі бі 59, пр. Аль-Фарабі, 050040, Алмати, Казахстан

⁵Національна нанотехнологічна лабораторія (NNLOT), Казахський національний університет ім. Аль-Фарабі
 пр. Аль-Фарабі, 71, 050040, Алмати, Казахстан

Наведено огляд понад 100 сучасних літературних праць вітчизняних та іноземних дослідників, присвячених питанням електродугового синтезу (ЕДС) різних вуглецевих наноструктур (ВНС). ЕДС ВНС можна здійснювати як у газовому, так і в рідкому середовищі. ЕДС у газовому середовищі має низку переваг, таких як висока продуктивність та швидкість процесу конденсації, а також легкість у керуванні режимами. Але такий метод синтезу також має недоліки: він вимагає наявності складної вакуумної та охолоджувальної системи, через що установки дуже громіздкі. Крім того, даний метод не вирішує проблему агломерації синтезованих ВНС і має побічний продукт синтезу у вигляді наросту (депозит) на електроді. ЕДС у рідкому середовищі відрізняється більшою компактністю обладнання, оскільки не потребує систем вакуумування (процес відбувається при атмосферному тиску) та охолодження (рідке середовище відіграє роль тепловідведення). При такому способі синтезу використовуються різні типи діелектричних рідин - від дистильованої води (H_2O), рідкого азоту (N_2) до вуглеводневих розчинників, які можуть слугувати джерелом вуглецю в зоні синтезу. Змінюючи склад рідкої фази, можна досягти синтезу різних типів ВНС. Також цей метод передбачає використання металевих електродів, які, крім тривалого терміну експлуатації, можуть виконувати роль каталізаторів. При цьому частинки металу можуть бути інкапсульовані ВНС, формуючи композиції з різними магнітними властивостями. У деяких роботах було показано, що при застосуванні металевих електродів у процесі ЕДС у рідкому середовищі можуть утворюватися суміші карбідів металів. Рідке середовище після ЕДС ВНС також являє науковий інтерес. Ймовірно, у рідкому середовищі містяться нові модифікації розчинних органічних сполук, пошуком яких займаються дослідники всього світу. Так, вчені виявили, що після ЕДС у рідкому середовищі з використанням графітових електродів робочий розчин (C_6H_6) змінив свій колір. Це говорить про утворення в ньому розчинних органічних сполук.

В огляді на основі літературних даних наведено таблицю режимів для промислового синтезу одностінних ВНС, а також наведено перелік режимів для створення дефектних ВНС, як метод збільшення площі адсорбції у наночастинок.

Зафіксовано вирішення важливих проблем методу ЕДС: агломерації ВНС; проблема формування депозиту; підвищення продуктивності.

Ключові слова: плазмохімічний синтез, електродуговий розряд, вуглецеві наноструктури (ВНС), вуглецеві нанокластери (ВНК), вуглецеві нанотрубки (ВНТ), кріогенні середовища, рідкі діелектрики

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Виробництво різноманітних дешевих вуглецевих наноструктур (ВНС) є важливою задачею сучасного наукового світу. Основою виробництва ВНС є розробка різних методів

© Ол.Д. Золотаренко, М.Н. Уалханова, О.П. Рудакова,
 Н.Е. Аханова, Ан.Д. Золотаренко, Д.В. Щур,
 М.Т. Габдуллин, Н.А. Гаврилюк, О.Д. Золотаренко,
 М.В. Чимбай, І.В. Загорулько, О.О. Гаврилюк, 2022

синтезу вуглецевих наноструктур з використанням каталізаторів. На сьогоднішній день синтезують сучасні розчинні [1–16] і нерозчинні [17–20] вуглецеві наноструктури, з яких можна створювати сучасні матеріали

[21–26]. В окремих випадках синтезовані ВНС здатні зберігати водень [27, 28] та конкурувати з існуючими матеріалами [29–40] для накопичувачів водню [41–42]. Вироби, створені з таких матеріалів, є технологічними шедеврами [43–46] сучасного світу.

З часу виявлення першої багатостінної вуглецевої нанотрубки (БВНТ) [47] у структурі сажі, отриманої термічним розкладанням вуглецю монооксиду на залізному каталізаторі [48], минуло багато часу. В даний час вуглецеві нанотрубки (ВНТ) отримують в електродуговому розряді як побічний продукт синтезу фуллеренів. Крім електродугового плазмохімічного синтезу, в якому графіт випаровується в електричній дузі інертного середовища при низькому тиску [49], існують інші методи отримання ВНТ. Наприклад, піролізний метод [50–51], лазерне випаровування [52–53], детонаційний метод [54]. Кожна методика одержання нанодисперсних речовин має як переваги, так і недоліки.

Піроліз раніше широко використовувався як найдешевший метод синтезу різних вуглецевих пірволокон та багатостінних нанотрубок і тому досить добре вивчений.

Електродуговий синтез (ЕДС) у газовому середовищі як метод одержання ВНТ звернув на себе увагу вчених лише після роботи Іджими у 1991 році [49], і на сьогоднішній день є одним із найпоширеніших. А у 2016 році українські та американські вчені номінувалися на Нобелівську премію з хімії за дослідження ВНС методом їхнього гідрування [55].

Електродуговий метод синтезу в газовому середовищі вважається одним з надійних та продуктивних методів з цілою низкою переваг:

1. – висока продуктивність;
2. – висока швидкість процесу конденсації;
3. – дисперсність частинок становить від 1 до 100–200 нм;
4. – вихідна сировина може бути піддана очищенню в ході реакції;
5. – можливість отримання на виході складних речовин та композитів шляхом змішування вихідних парів;
6. – зона міжелектродного простору має температуру близько 12000 К (рис. 1) [56];
7. – легко змінювати режими під час експерименту (силу струму, швидкість подачі прекурсора, тощо).

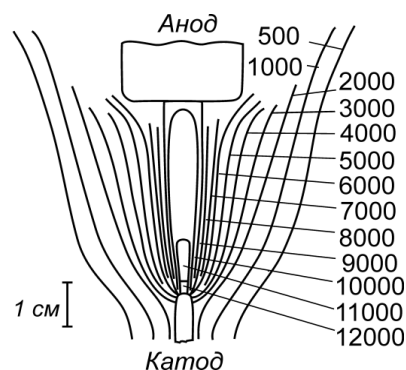


Рис. 1. Розташування температурних зон вздовж осі електричної дуги [56]

Однак, попри очевидні переваги, **метод плазмохімічного електродугового синтезу не позбавлений недоліків**, до яких можна віднести такі:

1. – широкий діапазон розподілу частинок за розмірами;
2. – високий, некерований ступінь агломерації частинок;
3. – громіздкість обладнання;
4. – необхідність наявності вакуумної системи;
5. – необхідність системи ефективного охолодження реактора.

З іншого боку, у цьому методі синтезу потребують пояснення ще багато незрозумілих моментів. Невизначеність у розумінні механізму зростання нанотрубок та формування фуллеренів перешкоджає прогресу у розвитку більш контрольованих технологій синтезу цих наноматеріалів. Проте, сьогодні вже робляться перші спроби вивчення та пояснення цих процесів [57–61].

Для введення металевого (Me) каталізатора при електродуговому методі отримання ВНС виготовляють спеціальні графітові порожнисті електроди.

Потреба вдосконалення методики плазмохімічного синтезу нанопорошків та створення нової установки для синтезу нанодисперсних речовин призвела до розробки електродугового методу у рідкій фазі. Результати розробки вперше доповідалися на конференції «Carbon» у Сполучених Штатах Америки (США) у 2000 році [62] українськими вченими з Інституту проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України. Метод електродугового синтезу в рідкій фазі позбавлений недоліків електродугового

синтезу (ЕДС) у газовій фазі і значно розширює спектр синтезованих продуктів.

Електродуговий синтез наноструктур у рідкій фазі обходиться не дорожче електродугового синтезу в газовому середовищі і відрізняється набагато меншою громіздкістю обладнання. Для дугового синтезу наноструктур у рідкій фазі не потрібна наявність вакуумних систем, оскільки процес проводиться при атмосферному тиску [63–65]. Вибір вуглеводневих розчинників для рідкої фази, як джерела вуглецю, для синтезу ВНТ забезпечує безперервність процесу [60]. Металеві електроди, що мають тривалий термін служби, при синтезі можуть виконувати роль каталізаторів та слугувати джерелом реагентів. При цьому металеві наночастинки можуть інкапсулюватись вуглецевими наночастинками, утворюючи наноккомпозити [66–72, 75, 83]. Ще однією перевагою дугового синтезу в рідкому середовищі є вирішення питання відведення тепла із високотемпературної реакційної області плазми (> 4000 К).

Однак, залишається невирішеним питання про ступінь агломерації частинок при електродуговому методі в рідкому середовищі, хоча при заміні газової фази на рідку агломерація значно зменшується.

Переваги електродугового синтезу вуглецевих наноструктур у рідкому середовищі порівняно з ЕДС у газовому середовищі:

1. Можливість створити безперервний електродуговий синтез наноструктур, що виключає зупинку синтезу для заміни електродів.

2. Мала конгломерація наноструктур. Утворюються переважно одностінні наноструктури через малий час синтезу та низьку концентрацію вихідних реагуючих речовин.

3. Відсутність дорогої та важкої в експлуатації вакуумної системи.

4. Для синтезу вуглецевмісних наноструктур можливе використання як електродів (анод, катод), а також рідкої фази. Можна підібрати умови синтезу таким чином, що електроди практично не будуть витрачатися, але використовуватиметься рідка фаза як джерело реагентів синтезу. Це

дозволить зробити процес синтезу вуглецевих наноматеріалів безперервним.

5. Процес синтезу ВНС відрізняється більшою безпекою порівняно з іншими методами, такими як дуговий розряд у газовій фазі, піролітичний метод та ін.

6. Відсутність водоохолоджувальних сорочок, що використовуються як елемент тепловідведення в електродугових реакторах для синтезу вуглецевих наноструктур в газовому середовищі. Рідка фаза в методі електродугового синтезу в рідкому середовищі виконує роль тепловідведення, а за рахунок випаровування рідкого діелектричного середовища знижується температура розчину. Це має важливе значення, враховуючи той факт, що температура електричної дуги досягає $12\ 000$ К [56].

7. Синтез у рідкій фазі дозволяє отримувати більш ширший спектр наноматеріалів, ніж аналогічний процес у газовій фазі, а головне – метод менш трудомісткий.

На сьогоднішній день синтез наноструктур електродуговим методом у рідкому середовищі поширений у всьому світі. Цим методом синтезують різні речовини [57–60, 63–65, 73–83]. Наприклад, китайським дослідникам вдалося створити умови синтезу для зростання ВНТ у газовому середовищі під графітовим ковпаком, зануреним у дистильовану воду (H_2O) [73] (рис. 2). Синтез проводився при вертикальному розташуванні електродів із джерелом прямого струму. В цьому випадку при утворенні електричної дуги виділяються гази: монооксиди вуглецю та водню [77, 84], які, у свою чергу, витісняють воду з камери росту нанотрубок. Для вирощування ВНТ як каталізатор використовували групи металів (Fe, Co, Ni) [78–82]. В даному випадку каталізатор для зростання ВНТ вводять у вигляді суміші металевого та вуглецевого порошку (5 : 1) у внутрішню порожнину електрода, який випаровується. Процес тривав одну хвилину, при цьому вихід нанопродукту становить 10 г/годину. Основний продукт є твердий депозит (300 мг), зібраний на катодному електроді. Даний метод, на думку авторів, дозволяє синтезувати нанопродукти, що містять більше 50% ВНТ, тоді як при синтезі тим самим методом, але без графітового ковпака в рідкому середовищі

(H₂O), у нанопродукті, синтезуватиметься ВНТ у кількості менше 20 %.

У всьому світі робляться численні спроби розробити нові недорогі процеси синтезу ВНС, і електродуговий метод у деіонізованій воді (H₂O) визнаний одним із найперспективніших [63, 74, 84–90]. Тому сьогодні вдосконалюються та розробляються нові методики для покращення та здешевлення процесу отримання вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) розглянутим методом у середовищі H₂O. Незвичайний внесок у цю область зробили китайські вчені, які повідомили про отримання фуллеренів та вуглецевих нанотрубок із китайського вугілля [91–94]. Дорогі графітові електроди замінили на вуглецеві стрижні з вугілля [95]. Вугілля перед використанням подрібнювалося і висушувалося. Подрібнений зразок вугілля змішували з порошком нікелю (~ 2.5 мас. %) та кам'яновугільною смолою (~ 20 мас. %), яка слугувала зв'язуючою речовиною. Після цього суміш пресували і карбонізували в потоці азоту (N₂) при температурі 1170 К протягом п'яти годин. Даний тип стрижня використовували як аноди, що випаровувалися. Час синтезу варіювався від 20 до 40 хв залежно від довжини виго-товленого вугільного витратного електрода. Міжелектродний проміжок (зазор) становив 2–3 мм.

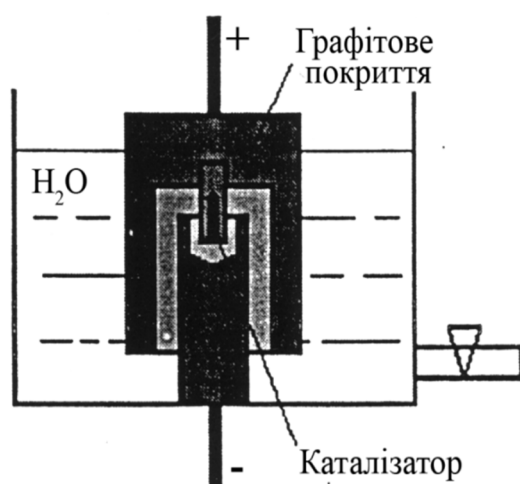


Рис. 2. Схема пристрою для дугового синтезу з водяним захистом [73]

Автори [73] повідомляють, що переважна кількість монокристалічного металу (нікель з гранцеваними кубічними (ГЦК) ґратами) інкапсульовано у вуглецеву

оболонку. Наночастинки нікелю, вкриті вуглецем, зберігають магнітні властивості.

Вугільні електроди – найдешевше альтернативне джерело вуглецю. Одна з основних переваг вугільного електрода перед графітовим – це їхня низька собівартість та простота введення будь-якого обсягу каталізатора (Me) в електрод для синтезу вуглецевих наночастинок (ВНЧ).

Графітові електроди теж потрапили під пильне вивчення дослідників Великобританії [58] та України [96]. Єдина відмінність графітових електродів, які проходять попереднє очищення як прожарювання – це їхні марки. Марки графітових стрижнів розрізняються в основному максимальною величиною зерна, густиною та кінцевою міцністю на вигин. Для випаровування графітових стрижнів марки з найгіршими характеристиками потрібні більш високі значення сили струму та більше часу на подолання міжелектродного простору, внаслідок чого у дузі виникає нестабільність, що веде до кристалічної дефектності в ВНМ. Це також було доведено експериментально, але дослідники Великобританії не розглядають структурні дефекти як негативний феномен, оскільки чим вище структурна дефектність ґраток, тим більшою буде площа адсорбції частинок, а це важливо для зберігання в ВНС різних газів.

Українські дослідники також зробили спробу заміни високоякісного графіту марки під назвою «Дрібнозернистий щільний графіт (МПП-7)» на дешевшу марку з назвою «Електрод графітовий спеціальний просочений (ЕГСП)» у електродуговому синтезі [96] у середовищі інертного газу (He). В результаті експерименту були отримані вуглецеві наноструктури різних типів, а також виконано порівняльний аналіз їхніх характеристик. У роботі визначено оптимальні технологічні умови синтезу ВНС з анодних графітових електродів порівнюваних марок. Методами скануючої та просвічуючої електронної мікроскопії було досліджено будову синтезованих вуглецевих матеріалів і показано, що при випаровуванні графіту марки ЕГСП формуються одностінні (ОВНТ) і багатостінні вуглецеві нанотрубки (БВНТ) навіть без застосування каталізатора (Me). За результатами диференціально-термічного, термогравіметричного та

диференціального термогравіметричного аналізу було встановлено температуру початку взаємодії утворених ВНС з киснем (O_2) повітря. За даними фотоспектрального аналізу продуктів синтезу проведено розрахунки та показано, що фуллеренова складова, отримана при випаровуванні графіту марки ЕГСП, містить 10–12 % фуллеренів C_{60} та C_{70} , що не гірше за показники графіту марки МПГ-7 [96].

Враховуючи дешевизну графіту марки ЕГСП у порівнянні з МПГ-7 (цифра 7 у кінці аббревіатури вказує на густину графіту), можна стверджувати, що вуглецеві наноструктури (вуглецеві нанотрубки, фуллерени та фуллереноподібні структури), синтезовані з графіту марки ЕГСП, мають нижчу собівартість. Цей факт є важливим результатом експерименту із синтезу вуглецевих фуллеренових молекул, оскільки сьогодні на їхній основі створюються нові сучасні нанотехнології.

Угорські вчені у галузі вивчення синтезу ВНТ [63, 84, 97] вирішили поєднувати синтез у рідкому середовищі з використанням джерела змінного струму з комп'ютерним контролем [74]. При такому методі синтезу у другій половині циклу катод стає анодом, а наріст (депозит) на катоді випаровується в плазмі. Тим самим було вирішено питання осадження та травлення нанотрубок на катоді, оскільки депозит, що утворюється на катоді, через наступну половину циклу самоочищується. З цієї причини метод, що передбачає використання змінного струму, підходить для безперервної роботи та автоматизації. Для такого синтезу використовували графітові електроди, які випаровувалися в деіонізованій воді під дією змінного струму, що змінюється в межах 85–45 А при напрузі 40 В. Даний метод дозволяє отримувати 10–5 мг/хв вуглецевого нанопродукту та супроводжується безперервним утворенням бульбашок газу: монооксиду вуглецю CO (чадний газ) та водню (H_2) [84, 77]. Експерименти проводили за різних значень сили струму. Результати дослідів свідчать, що з низьких значень сили струму активізуються окиснювальні процеси, а за високих значень – формується вуглець в елементних і твердих формах (сажа, пакети графенів).

Одні з перших експериментів з випаровування графітових електродів (C/C) електродуговим методом у кріогенному середовищі були проведені в рідкому азоті (N_2) [98] (рис. 3), а потім було доведено, що альтернативним середовищем може бути деіонізована вода (H_2O) [63, 84].

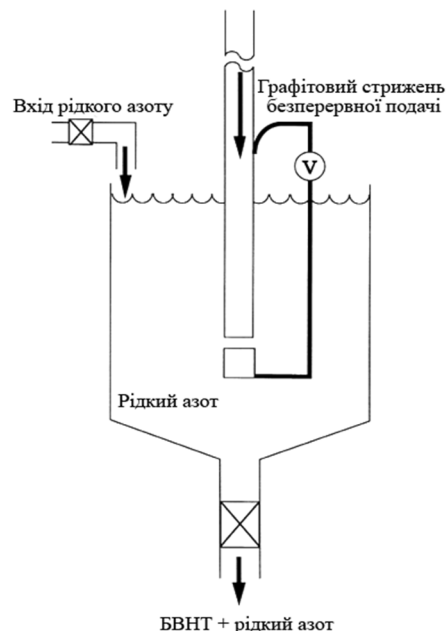


Рис. 3. Електродугова установка синтезу ВНС з автоподачею рідкого азоту (N_2) та анода, який витрачається [98]

Різниця синтезу ВНЧ у цих двох середовищах була пояснена дослідниками Великої Британії [58]. Експерименти проводилися в деіонізованій воді та рідкому азоті з графітовими електродами різних марок при однаковому постійному струмі, що дорівнює 10 А [58]. Деіонізована вода і рідкий азот однаково добре виконують функцію утримування та конденсації пари, що утворюється в процесі електродугового розряду. Однак, поверхневе випаровування цих рідин різниться. Цей фактор важливий при аналізі впливу на стійкість та однорідність бульбашок газу навколо електродугового простору у процесі синтезу.

При електричній дузі у рідині утворюються гази, що виділяються у вигляді бульбашок. У бульбашках газів проходить процес загартування ВНЧ так само, як це відбувається на межі електричної дуги пар/рідина, відповідно, у них триває формування наночастинок. У рідкому азоті всередині бульбашки газу значення тиску і

цілності перевищують аналогічні параметри бульбашки у воді, оскільки азот знаходиться в киплячому стані в нормальних умовах навіть при розриві електричної дуги і випаровується швидше за воду при контакті з гарячим паром. Тому електрична дуга у рідкому азоті буде менш стабільною, ніж у воді. Це і було доведено вченими Великої Британії, що синтезують різні ВНЧ у рідкому азоті з численними дефектами структурної ґратки, оскільки такі дефекти виникають в основному в частках, отриманих в умовах нестійких параметрів електродугового синтезу.

Також вченими Великої Британії [58] та України [61] було висунуто припущення про можливий механізм формування ВНТ. Об'єм вуглецевої плазми можна умовно поділити на дві області: перша – серцевина (область 1) охоплює простір поблизу електродугового джгута. У цій області температура становить ~ 4000 К, наближаючись до температури плавлення (3823 К) та кипіння (4203 К) графіту. Передбачається, що електрони рухаються спрямовано, паралельно до електричного поля. По мірі збільшення кількості вуглецю, що видаляється з анода, плазма розширюється, відштовхуючи рідину, і у результаті утворюються бульбашки газу. Область 2 – об'єм між серцевиною та міжфазною межею пар/рідина. Згідно з цим припущенням, найбільш придатною областю для зростання нанотрубки є серцевина. З іншого боку, вуглецеві цибулини формуються в процесі конденсації пари на міжфазному кордоні пар/рідина, де рух вуглецевих частинок менш спрямований.

Українські дослідники відділу № 67 в ІПМ НАН України [61] зробили крок у напрямку дослідження закономірності формування вуглецевих наноструктур при електро-дуговому випаровуванні графіту. Одним з головних висновків можна вважати той факт, що мікро- та макрокількості вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) утворюються на стадії формування зародків, тобто наноструктурний продукт складається із зародків різних структур [61].

Також у роботі описані фізико-хімічні процеси, що відбуваються в реакторі синтезу при плазмових температурах [56] з урахуванням поведінки частинок у електромагнітних полях при екстремальних градієнтах температури та тиску. Була

запропонована послідовність організації речовини при формуванні вуглецевих структур за розмірним рівнем, а також досліджено самоорганізацію систем при електродуговому випаровуванні графітових або графітовмісних електродів. Розглянуто механізми формування розчинних (фуллерени та фуллереноподібні структури) та нерозчинних (наноккомпозити, ВНТ, графени) вуглецевих наноструктур [61], що важливо для розуміння природи електродугового методу синтезу ВНС та можливість заздалегідь прогнозувати одержані продукти даного методу.

У 2004 р вчені Сполучених Штатів Америки та Японії у спільній роботі [57] теж задалися питанням про роль рідкого середовища в електродуговому синтезі, а також відмінністю властивостей ВНЧ, отриманих у рідкому азоті та деіонізованій воді. Дослідження проводилися при постійному струмі на електродуговій установці в рідкому середовищі з графітовим катодом і композитним анодом, що містить нікель (Ni) ~ 0.7 моль %. Тривалість одного циклу синтезу становила 97 с, при цьому вихід порошку ВНЧ становив 0.57 мг/с, а депозиту – 4.5 мг/с.

У процесі аналізу ВНЧ, синтезованих електродуговим методом серед рідкого азоту, було виявлено нові структури частинки – вуглецеві наноріжки (ВНР), гібридизовані вуглецевими нанокластерами (ВНК), що містять Ni (ВНР-ВНК) [57]. При використанні рідкого середовища деіонізованої води частинки ВНР-ВНК не були виявлені, але знайдені ВНК, що містять нікель. Отже, середовище рідкого азоту може відігравати важливу роль у формуванні структур вуглецевих ріжків. У запропонованій теоретичній моделі формування комплексу частинок ВНР-ВНК, що містить нікель (рис. 4), враховується хімічна інертність азоту (N_2). Розглянута модель має на увазі тристадійний процес утворення ВНР-ВНК. На першій (I) стадії вуглець та нікель випаровуються з анода під дією високотемпературної електродугової плазми. Випарений вуглець та нікель переходять у газову фазу і витрачаються на синтез вуглецевих наноструктур у зоні дуги (рис. 4 а). На другій (II) стадії наночастинки нікелю та сформовані вуглецеві нанокластери

(ВНК), перенасичені вуглецевою парою, переносяться в холодну зону всередині бульбашки газу. При зіткненні атомарного вуглецю або вуглецевих нанокластерів утворюються наноріжки (ВНР) [99]. У момент каталітичного зростання вуглецевих

наноструктур на поверхні нікелю у зоні синтезу утворюються ВНК. (рис. 4 б). На третій (III) стадії різки агрегуються навколо ВНК, що є зародком (рис. 4 в) частинки ВНР-ВНК.



Рис. 4. Схематична модель утворення гібридних частинок ВНР, що включають ВНК, які містять нікель [57]: а – Стадія I – високотемпературна зона, розчинення вуглецю в наночастинці нікелю, вуглецева пара; б – Стадія II – холодна бульбашка газу, утворення ВНК, зародження комплексу; в – Стадія III – швидке загартування продуктів синтезу, синтез комплексу ВНР-ВНК, стабілізований продукт

Таким чином, кожен вид рідкого середовища при впливі електричної дуги може стимулювати зростання різних гібридних модифікацій, що вимагає від вчених детального вивчення будь-якого придатного середовища для синтезу ВНК.

Японськими дослідниками було розглянуто питання впливу концентрації парів каталізаторів при електродуговому синтезі в рідкому середовищі [100]. Електродугові синтези проводили у рідкому азоті з графітовим катодом і композиційним анодом, що містить різну кількість нікелю (0–28.1 моль %). При постійному струмі (обсяг рідкого середовища 300 мл) здійснювалася горизонтальна подача електрода з витримкою міжелектродного зазору 1 мм. Після електродугового синтезу у рідкому азоті тривалістю 45 с був отриманий об'ємний депозит.

При випаровуванні анода без каталізатора (нікелю) у продуктах синтезу спостерігалися одностінні вуглецеві наноріжки (ОВНР) високої чистоти. ВНР були інкапсульовані у кілька графітних оболонок. Концентрація нанотрубок та багатогранних каркасних частинок була дуже низькою. Для синтезу ОВНР, що містять частинки нікелю, необхідно випаровувати анод із вмістом > 0.64–7 моль % Ni (Таблиця 1). Такі частинки нікелю зазвичай мають ГЦК-ґратку [57]. Однак для виявлення ВНС, що містять

частинки нікелю, необхідно ретельне сканування. При випаровуванні анода з 1.8–4.6 моль % Ni більшість синтезованих ОВНР містить наночастинки нікелю. Крім ОВНР, що містять нікель, у цій групі продуктів спостерігаються також одностінні вуглецеві нанотрубки (ОВНТ). ОВНТ утворюють сітку між частинками каталізатора (Me) та у багатьох випадках об'єднуються у пучки.

Депозит, що сформувався на кінці катода при випаровуванні анода, що містить 0.64–4.6 моль % каталізатора (Ni) (Таблиця 1), є основним наноструктурним продуктом. У його обсязі було зафіксовано наявність багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ). Крім того, як побічний продукт синтезу в депозиті були виявлені ОВНР із включеннями частинок нікелю, проте присутність ОВНТ не була виявлена.

При випаровуванні анода з 6.4–28.1 моль % каталізатора (Ni) у продуктах синтезу не спостерігається ОВНР та ОВНТ (Таблиця 1). Натомість ідентифікуються лише агломеровані, практично сферичні структури, що містять частинки нікелю. Це означає, що надмірна концентрація парів нікелю в зоні дуги пригнічує утворення одностінних вуглецевих наноструктур.

При проведенні японськими вченими аналогічних досліджень у деіонізованій воді формування ОВНТ не було підтверджено

[100]. Неодноразові експерименти проводилися з композиційним графітовим анодом із вмістом ~ 1.8 моль % Ni, але ОВНТ так і не було виявлено [100]. У той же час методом синтезу в рідкому азоті при використанні катода з аналогічним вмістом

нікелю були отримані ОВНТ. Таким чином, дослідники дійшли висновку, що відносно інертне середовище в області дуги відіграє важливу роль при утворенні одностінних структур.

Таблиця. 1. Синтез вуглецевих наноструктур [57, 100]

Продукт синтезу	БВНТ, ОВНР (10 %)	ВНР	ОВНР, ОВНТ	Нанокompозити (Сферичні частинки)
Матеріал анода	Графіт (С)	Графіт (С)	Графіт (С)	Графіт (С)
Матеріал катода / вміст каталізатора (Ni)	Графіт з нікелем (С-Ni) / Ni = 0.64–4.6 моль %	Графіт з нікелем (С-Ni) / Ni = >0.64–7 моль %	Графіт з нікелем (С-Ni) / Ni = 1.8–4.6 моль %	Графіт з нікелем (С-Ni) / Ni = 6.4–28.1 моль %
Середовище синтезу	Азот (N)	Азот (N)	Азот (N)	Азот (N)
Час синтезу, с	45	45	45	45
Об'єм рідкого середовища, мл	300	300	300	300
Міжелектродний проміжок (зазор), мм	1	1	1	1
Депозит	+	+	+	+

Наукова громадськість Японії та України повернулася до аналізу парів каталізатора платини (Pt), мотивовані енергією, одержуваної за допомогою паливного елемента з полімерним електролітом для водневої енергетики [101–104]. Вуглецеві наночастинки – прекрасний носій каталізатора платини з розвиненою поверхнею, який використовується для перетворення атома водню на протон, окиснення водню та отримання води, що призводить до утворення електроенергії в паливному елементі з полімерними мембранами [105–106]. В даний час було здійснено безліч спроб отримання вуглецевих наночастинок (ВНЧ) з платиновим навантаженням [101–108]. Зазвичай такі частинки одержують хімічним способом у дві стадії. На першій (I) стадії одержують вуглецеві частинки з розвиненою поверхнею. На другій (II) стадії готують розчин сполук платини (H_2PtCl_6) та змочують ним вуглецевий матеріал. Якщо просочений розчином вуглецевий матеріал обробити при високій температурі у середовищі водню, сполука H_2PtCl_6 відновлюється до металічної платини (Pt) на поверхні вуглецевих частинок.

При розгляді ВНЧ як потенційні носії платини можна припустити, що

рентабельніше отримувати одностінні вуглецеві наноструктури (ОВНС). Це істотно підвищить перевагу при масовому отриманні структур, які містять платину, для паливних елементів.

Автори роботи [101] проводили електродуговий синтез у рідкому азоті (3 000 мл), використовуючи графітовий катод та композиційні аноди, що містять невелику кількість платини (0.4 та 1.3 ат. %). Міжелектродна відстань становила 1 мм. У той же час, українські вчені відділу № 67 в ІІМ НАН України наголосили на створенні ВНС, які вже містять у своїй структурі платиновий (Pt) каталізатор [102–104, 106, 109]. Випаровування графіту марки МПГ-7 проводили в середовищі гелію (He) і із застосуванням каталізатора (Pt). У роботі використовували порожні витратні графітові анодні електроди, що містять дротяний платиновий каталізатор, закріпленний порошком графіту. Таким чином було створено вуглецеві наноматеріали (ВНМ), що містять платину: фуллерени, нанокompозити, графени, одностінні (ОВНТ) та багатостінні (БВНТ) вуглецеві нанотрубки. Вчені провели дослідження на мікро- та нанорівні морфології та матеріалів структур, сформованих на катоді, а також вивчили

вплив парів платини на процеси формування наноструктур. Методом рентгенівського мікроаналізу було встановлено, що більшість платини з потоком конденсату осідає на стінках реактора. Згідно з даними емісійного спектрального аналізу, найбільша кількість платини ($> 1\%$ за масою) накопичується в пристінній сажі. Частина платини (менше $< 1\%$ мас. %) в катіонному стані під дією сильного електричного поля разом з вуглецевою парою переміщується на катод, формуючи депозит, що містить Pt. Встановлено, що платина у складі депозиту присутня, незважаючи на високу температуру в зоні формування депозиту (до $11727\text{ }^\circ\text{C}$) [56], що значно перевищує температуру кипіння Pt ($3800\text{ }^\circ\text{C}$). Платина у продуктах синтезу розподіляється так: серцевина депозиту – менше 0.001% , оболонка депозиту – менше 1% , пристінна сажа – більше 1% .

У японських дослідників також основною проблемою синтезу лише серед рідкого азоту (N_2) стало формування депозиту [100]. Отриманий депозит формувався на краю катода з БВНТ та наявністю ОВНР у синтезованому порошковому продукті [100]. Також було встановлено, що при більшій концентрації платини (Pt) вихід порошоків та обсяг депозиту збільшується. В обсязі депозиту спостерігалися наночастинки платини. У порошковому продукті було виявлено частинки аморфного вуглецю та ОВНР, на поверхню яких диспергована платина. Було показано, розмір частинок платини залежить від концентрації Pt в аноді. Крім того, було з'ясовано, що при концентрації 0.4 ат. \% Pt в аноді відсотковий вміст частинок платини діаметром менше 5 нм становить 90% , у той час як при випаровуванні анода з концентрацією Pt 1.4 ат. \% концентрація пара каталізатора підвищується, а вміст дрібних частинок платини становить близько 60% . Розмір частинок платини при останньому варіанті випаровування дещо перевищує розмір частинок платини, що спостерігаються при першому способі випаровування. Таким чином, японські вчені з'ясували, що розмір частинок платини можна контролювати, підбираючи концентрацію платини в аноді. Крім того, у цитованій роботі були отримані агломерати БВНТ із платиновим навантаженням у вигляді депозиту.

Найчастіше питання агломерації кінцевого продукту при електродуговому синтезі у рідкому середовищі не розглядалося, або вирішувалося коротким часом синтезу ($30\text{--}97\text{ с}$) і зниженою витратою реагентів на формування депозиту [73–60, 76, 95, 100–101]. Дослідники відділу № 67 в ПІМ НАН України пішли далі та створили спеціальну установку, за допомогою якої вирішили питання агломерації ВНС при електродуговому синтезі. Час синтезу в модернізованій установці стало в середньому становити $1\cdot 10^{-9}\text{ с}$, а температура рідкого середовища трималася в межах від $4\text{ до }340\text{ К}$ при силі струму $200\text{--}300\text{ А}$ [67–72, 75, 83, 110]. За таких умов, забезпечених нехитрим апгрейдом установки, у процесі синтезу встигають утворитися зародки ВНС і швидко загартуватися в рідкому середовищі.

Проблема всіх дослідників електродугового синтезу ВНС – депозит, що утворюється на катоді. Українські вчені вирішили і це питання, збільшивши зазор між електродами, який дорівнював $> 1\text{ мм}$ [67–72, 75, 83, 110], що призвело до відсутності депозиту на катодному електроді. Українські дослідники подібний ефект пояснюють тим, що зарядженим частинкам, які утворилися в зоні синтезу електричної дуги, тепер мають долати бар'єр рідкого середовища, що є вкрай проблематично. Усунення формування депозиту важливе досягнення, оскільки при синтезі маса депозиту частіше більша за масу нанопродукту.

У спільній роботі вчені-дослідники Японії та Таїланду [76] зробили ще одну спробу вирішення проблеми агломерації частинок в електродуговому синтезі в рідкому середовищі. Вони акцентували свою увагу на параметрах дуги, що контролюють процес синтезу ВНС, і використовували в процесі синтезу примусовий конвективний потік [76]. Електродуговий синтез проводили у деіонізованій воді з використанням графітових електродів (C/C) при міжелектродній відстані близько 1 мм . У процесі синтезу деіонізована вода циркулювала за допомогою відцентрового насоса. Захоплення води для насоса здійснювалося біля стінки реактора, потім потік виходив через насадку діаметром 4 мм з відривом 15 мм від епіцентру дуги (рис. 5).

Авторами повідомляється, що у процесі синтезу утворюється масивний депозит, тоді як порошкового продукту синтезується дуже мало.

Цей метод значно зменшує агломерацію структур, але збільшує кількість кристалічних дефектів у стінках БВНТ, синтезованих за надзвичайно сильного потоку води ($3.2 \text{ дм}^3/\text{хв}$). У ході досліджень було показано, що існує оптимальний режим роботи електродугового синтезу з примусовим конвективним потоком (при силі потоку $1.36 \text{ дм}^3/\text{хв}$), де ВНЧ мають добре впорядковану графітізовану структуру, а їхній вихід становить 9.32 г/год . Також при використанні конвективного потоку збільшується вихід кінцевого нанопродукту і прискорюється процес загартування ВНЧ у рідкій фазі зі значно меншою агломерацією, ніж при синтезі електричної дуги в рідкій фазі без застосування конвективного потоку.

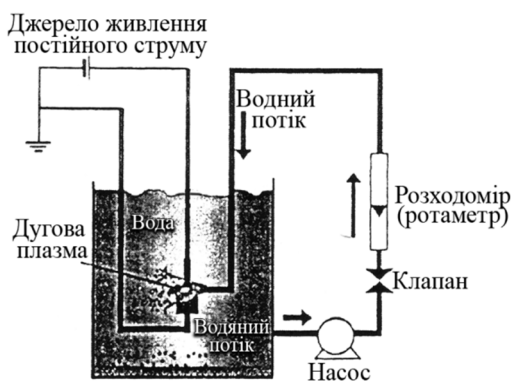


Рис. 5. Схема установки для отримання ВНЧ дуговим розрядом у воді із примусовим конвективним потоком [76]

Нідерландськими та японськими вченими було запропоновано незвичайне вирішення проблеми агломерації наноструктур [59]. Автори провели ряд експериментальних досліджень щодо визначення впливу кількості атомів вуглецю та їхніх зв'язків (C-C, C-H) у молекулі розчинника, а також впливу типу металевих електродів (Fe/Fe, Ni/Ni) на формування впорядкованих вуглецевих наноструктур (рис. 6) за умов тридцяти-секундного синтезу. Синтез проводили у двох розчинниках: циклогексані (C_6H_{12}) та толуені (C_7H_8), вони мають лише одинарний зв'язок та бензенове кільце.

Експериментальна установка складається з пари електродів (анод та катод), занурених

у 1000 мл вуглеводневого розчинника. Пара залізних і нікелевих стрижнів мали чистоту 99% , а при випаровуванні кожної пари витримували міжелектродний проміжок менше 1 мм .

В результаті досліджень було висунуто припущення, що кількість вуглецю, що входить до молекули розчинника, визначає швидкість формування вуглецевих наноструктур. Таким чином, толуол можна перетворити на ВНС більш ефективно, ніж циклогексан. Вважається також, що бензенове кільце в толуені більше сприяє формуванню нановуглецю, ніж одинарний зв'язок у циклогексані; π -електрон, що належить бензеновому кільцю, може ефективно працювати, створюючи наноструктури. Також у ряді експериментів було показано, що толуен ефективніше перетворився на графіт порівняно з циклогексаном.

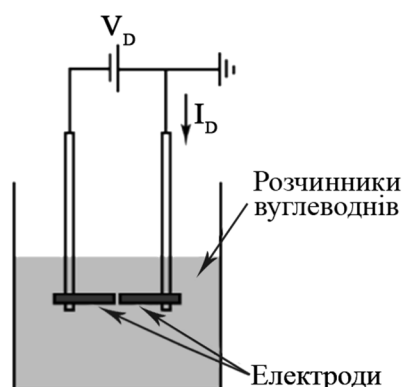


Рис. 6. Схема електродугової установки синтезу ВНС, де рідке вуглеводневе середовище використовується як джерело вуглецю (C) у зоні синтезу [59]

У ході експериментів при використанні різних пар залізних та нікелевих стрижнів було встановлено, що при синтезі вуглецевих наноструктур із застосуванням залізних електродів утворюється менше нанопродукту порівняно з використанням нікелевих електродів [59]. Крім того, не формується шарувата структура. У разі застосування нікелевого електрода одержують графітовий лист з нікелевою серцевиною як у толуені, так і в циклогексані.

Таким чином, були зроблені кроки для розуміння, що не лише рідке середовище впливає на кінцевий вихід продукту, а й матеріал металевих електродів. Але висновки

вимагають більш детального вивчення та породжують ще більше питань.

Інтерес до вивчення процесу синтезу ВНЧ у низькотемпературних рідинах [63, 77, 85, 89, 98, 100] плавно перейшов у полювання на отримання високоякісних ВНЧ з максимальним виходом у різних рідких середовищах. Даний метод дав можливість синтезувати БВНТ [77, 85, 89, 98, 100], ОВНТ [100], ОВНР [100], наноцибулини [63], заповнені металом наночастинки, ВНТ [77, 89, 100] та нанокомпозити [66–72]. Загальною особливістю процесів, висвітлених у цих статтях, є те, що вуглець надходить у зону синтезу під час випаровування графітових електродів. Проте швидкість отримання ВНМ обмежена швидкістю випаровування графітових електродів. При використанні органічної рідини як джерело вуглецю для синтезу збільшується час безперервності процесу та швидкість синтезу наноматеріалу [60, 67–72, 75, 83, 110]. Процес загартування вуглецевих наночастинок не відрізняється від процесу загартування наночастинок в неуглецевих рідинах. Але при розгляді нанометалевих частинок, синтезованих у

неуглецевих діелектричних рідинах, виявлена можливість взаємодії наночастинок металу (Me) з киснем (O_2), в результаті чого утворюються оксиди. А при застосуванні вуглеводневих рідин, що містять атоми кисню, у процесі синтезу ВНС окиснення металів уповільнюватиметься або зовсім зупинятиметься, оскільки нанометали будуть покриті тонкою наноструктурною плівкою.

Українські вчені відділу № 67 в ІПМ НАН України показали, що в процесі електродугового синтезу в рідкому середовищі при використанні металевих електродів (Fe, Co, Ni) [67–72, 75, 83, 110] (Таблиця 2) утворюються карбіди металу з формуванням нанокомпозитів різного діаметра (D). Для підтвердження цього факту автори надали дані рентгеноструктурного аналізу, комбінаційного розсіювання світла та атомно-силової мікроскопії, які показали, що синтезовані зразки містять домішки різних модифікацій вуглецю та карбіди металів. У роботі українців також зазначено, що у процесі синтезу порошковий електрод насипного характеру підвищує продуктивність електродугового методу синтезу ВНС [64, 68].

Таблиця 2. Фазовий склад та величина області когерентного розсіювання (ОКР) порошоків заліза та нікелю до та після синтезу [68]

Зразок	Фазовий склад	Вміст, %	D , нм
Fe порошок, початковий стан	α -Fe	100	270
Порошок Fe після синтезу	α -Fe	24	–
	Fe ₃ C	76	24
Порошок Fe після нагрівання	α -Fe	73	110
	Fe ₃ C	11	40
	Fe ₃ O ₄ , FeO	16	100
Порошок Ni, вихідний стан	Ni	100	150
Порошок Ni після синтезу	Ni	96	150
	Ni-C	4	
Ni порошок після нагрівання	Ni	100	130

У всьому світі ведуться дослідження процесу плазмохімічного синтезу в рідкому середовищі та проводиться аналіз продуктів, які отримуються. Але лише деякі звертають увагу на відпрацьоване рідке середовище після синтезу ВНЧ. Ми вважаємо, що в цих

розчинах можуть бути нові модифікації розчинних органічних сполук «X», які шукають дослідники всього світу. Японські вчені у своїх дослідженнях звернули увагу на зміну кольору органічного робочого розчину бензену (C_6H_6) після електродугового синтезу

рідкому середовищі з використанням графітових електродів (С/С), що мають міжелектродний зазор 1 мм (рис. 7). [60]. Це означає, що у рідкому бензені утворилися розчинні органічні сполуки.

Вихід продукту одного такого синтезу становив 9.2 мг/с, а депозиту – 19.2 мг/с. Відмічено, що маса депозиту, отриманого в рідкому бензені, значно більша, ніж маса депозиту, синтезованого у неуглеводневому середовищі. Як стверджують автори роботи, атомна взаємодія в органічних розчинниках активніша. Крім того, підтверджено, що в даних умовах синтезу фуллерени не утворюються.

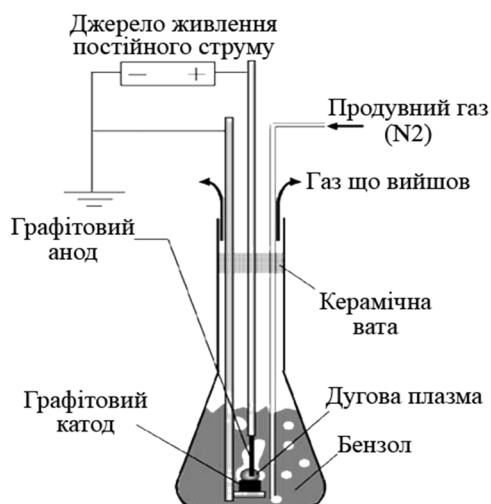


Рис. 7. Установка щодо вивчення зміни кольору органічного робочого розчину при електродуговому синтезі ВНС [60]

Важливе питання щодо вивчення механізму формування депозиту для його можливої подальшої утилізації як побічного продукту електродугового синтезу ВНС торкнулися українських вчених відділу № 67 ПІМ НАН України [102, 103, 109]. У роботах було встановлено, що при каталітичному електродуговому синтезі депозитні складові (серцевину та кору) можна розглядати як незалежні продукти плазмохімічного синтезу. Фізико-хімічні методи аналізу показали, що серцевина депозиту наповнена ВНТ, а кора складається з пакетів графену, що містять слідову кількість каталізатора, який застосовувався при синтезі [102–103, 109].

Також українські вчені змогли розробити безкаталітичний спосіб синтезу вуглецевих нанотрубок електродуговим плазмохімічним методом [111–113]. Це дуже цінне досягнення, оскільки з метою отримання чистих ВНС їх обробляють кислотами для видалення каталізатора. Ця процедура є відносно дорогою, а головне – вона робить ВНС дефектними та хімічно забрудненими. Автори технології проводили безкаталітичний електродуговий синтез ВНС серед рідкого гелію (He) при випаровуванні двох графітових електродів [113]. Результати аналізу продуктів синтезу показали, що отриманий ВНС не вимагають додаткового очищення та містить до 90 % вуглецевих нанотрубок (рис. 8). Таких результатів важко досягти при використанні різних методів очищення нанотрубок.

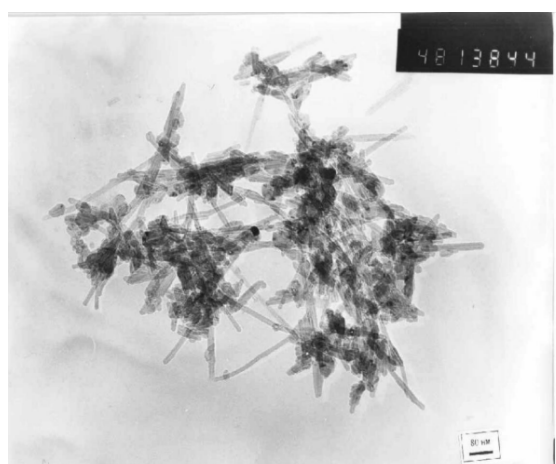
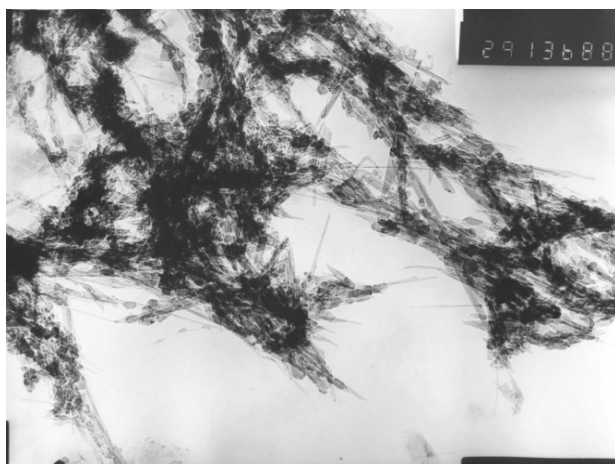


Рис. 8. Нанотрубки, одержані в рідкому гелії без каталізатора

Виходячи з вищесказаного, електродуговий метод синтезу являє практичний інтерес для виробництва вуглецевих наноструктур (ВНС) у промислових масштабах, що й реалізували угорські

дослідники у 2003 році [114] (рис. 9). Багато дослідників автоматизували системи електродугового синтезу ВНС, що полегшило дослідження даного методу [115] (рис. 10).

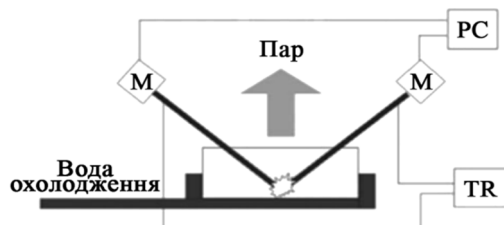


Рис. 9. Установа безперервного виробництва вуглецевих нанотрубок (ВНТ) із графітових електродів (C/C) при використанні підводної (H₂O) електричної дуги змінного струму [114]

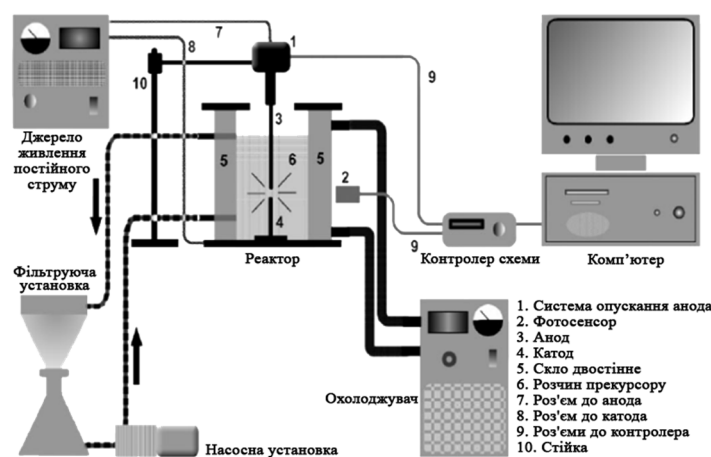


Рис. 10. Автоматизована система електродугового синтезу ВНС [115]

Дуже цікаві дослідження проводять китайські та українські вчені у галузі вивчення впливу магнітного поля на вуглецеві наноматеріали, отримані при випаровуванні графітових електродів (C/C) у середовищах рідкого азоту та дистильованої води. Продуктом такого синтезу при накладенні поперечного магнітного поля стали БВНТ, вуглецеві цибулини, інкапсульовані в метал-вуглецеві цибулини та одностінні вуглецеві наноріжки [116] (рис. 11). У процесі експерименту було встановлено, що якщо до дугового розряду буде прикладене поперечне змінне магнітне поле, це порушить стабільність стовпа дуги. Як було показано у матеріалах даного літературного огляду, нестабільність стовпа електричної дуги може каталізувати процес синтезу дефектних вуглецевих наноструктур.



Рис. 11. Схема електродугової установки синтезу в рідкому середовищі з вбудованим поперечним магнітним полем [116]

Українські вчені стверджують, що ВНС, отримані електродуговим методом у рідкому середовищі, завдяки своїй високій дисперсності, придатні для використання у технології 3D друку СJP [117] та створення нових матеріалів та композитів, як витратної сировини для технологій 3D друку FDM та SLA [21–26, 118, 119].

У дослідженнях з технології 3D друку СJP проводилися роботи, присвячені створенню електропровідної кераміки із різних ВНС (рис. 12). На основі цього композиту було створено електроди для паливних елементів, на яких проходить окиснення водню (H_2) з виділенням електричного струму [117]. Це є важливий крок для водневої енергетики сьогодні.

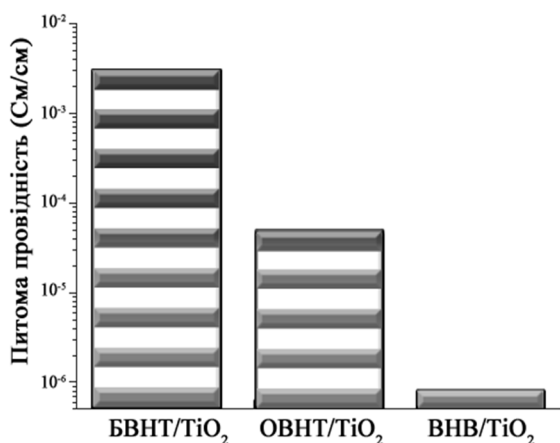


Рис. 12. Залежність електропровідності композитів ВНС/ TiO_2 (3 мас. %) від типу вуглецевих наноструктур, які містяться у кераміці [117], де ВНВ – вуглецеві нановолокна

ВИСНОВКИ

З проведеного огляду літератури можна зробити висновок, що на сьогоднішній день дуговий синтез вуглецевих наноматеріалів у рідкому середовищі є найменш вивченим методом.

Проте, аналіз науково-дослідних робіт дозволяє стверджувати, що електродуговий синтез наноструктур у рідкій фазі дозволяє:

1. Синтезувати широкий спектр вуглецевих наноструктур (ВНС), таких як вуглецеві нанокластери (ВНК) [57], вуглецеві наноріжки (ВНР) [57], одностінні вуглецеві нанотрубки (ОВНТ) [100], багатостінні вуглецеві нанотрубки (БВНТ) [76, 77, 85, 89, 98, 100] і наноцибулини [63], та нанокомпозити [47–108];

2. Проводити експерименти в рідкому діелектричному середовищі різного хімічного складу, який бере участь у процесі синтезу [57, 59, 60, 67–72, 75, 83, 99, 110–113];

3. Впливати на продукти електродугового синтезу шляхом варіювання хімічного складу електродів (анода та катода) [57, 59] та рідкого середовища [60, 67–72, 75, 83, 110–113];

4. Вирішити питання громіздкості обладнання для електродугового плазмохімічного синтезу наноструктур;

5. Позбутися дорогої та громіздкої вакуумної системи [47–108];

6. Проводити синтез ВНС у криогенних рідких середовищах [113];

7. Забезпечити безперервний процес синтезу нанопродуктів [114–115];

8. Здійснити синтез наноструктур даним методом, що дозволяє створювати нові матеріали та композити [21–26, 117–119].

Феномен синтезу дефектних вуглецевих наноструктур можна як метод збільшення площі адсорбції наночастинок. З цієї причини було створено перелік умов, що ведуть до збільшення дефектних утворень у процесі електродугового синтезу ВНС:

1. Конвективний напір робочого розчину швидкістю $3.2 \text{ дм}^3/\text{хв}$ у зоні синтезу [76];

2. Синтез ВНС у криогенних рідких середовищах [58];

3. Використання низькоякісного дешевого графіту у процесі синтезу [58, 96].

Оскільки одним із найцінніших продуктів електродугового методу вважаються одностінні вуглецеві наноструктури (ОВНС), було створено Таблицю 3, де перераховані умови синтезу таких структур. Аналіз науково-дослідних робіт показав, що надмірна концентрація парів каталізаторів (Me) у зоні електричної дуги пригнічує синтез одностінних вуглецевих наноструктур, таких як одностінні вуглецеві наноріжки (ОВНР) та одностінні вуглецеві нанотрубки (ОВНТ). А також передбачається, що відносно інертне середовище в області дуги відіграє важливу роль при синтезі ОВНС [57, 100, 113].

Основні висновки:

- Один з найважливіших результатів аналізу полягає в тому, що при електричній дузі хімічний склад діелектричного рідкого середовища та електродів може стимулювати зростання різних гібридних модифікацій ВНС [57, 59–61, 67–72, 75, 83, 110–113].

• Наукова проблема агломерації вуглецевих наночастинок у процесі їхнього синтезу електродуговим методом у рідкому середовищі вирішена шляхом встановлення спеціального магнітного вібратора на електрод, що дозволяє зводити та розводити електроди за частки секунди, створюючи тим самим уривчасту електричну дугу [67–72, 75, 83, 110]. Таке нововведення дає змогу контролювати високу швидкість процесу синтезу. Проблема агломерації наноструктур піднімалася майже у кожній статті електродугового методу [57–60, 73, 76, 95, 100, 101].

• Наукова проблема формування депозиту, як побічного продукту синтезу ВНС електродуговим методом у рідкому середовищі, вирішена збільшенням між-

електродного зазору (> 1 мм) або встановленням спеціального магнітного вібратора, який дозволяє зводити та розводити електроди за частки секунди [67–72, 75, 83, 110].

• Розроблено різні режими промислового синтезу одностінних вуглецевих наноструктур (ОВНС) (Таблиця 3).

• Виведено режими для створення дефектних вуглецевих наноструктур як метод збільшення площі адсорбції у наночастинок [58, 76].

• Розроблений метод підвищує продуктивність електродугового синтезу ВНС у рідкому середовищі, де використовується порошковий електрод насипного характеру [68].

Таблиця 3. Синтез одностінних вуглецевих наноструктур

Продукт синтезу	БВНТ, ОВНР (10 %)	ОВНТ	ОВНР, ОВНТ	ВНТ (85–90 %)
Анод	Графітовий (С)	Графітовий (С)	Графітовий (С)	Графітовий (С)
Катод	Графіт з нікелем (С-Ni) Ni = 0.64–4.6 моль %	Графіт з нікелем (С-Ni) Ni = 1.8 моль %	Графіт з нікелем (С-Ni) Ni = 1.8–4.6 моль %	Графітовий (С)
Середовище синтезу	Азот (N)	Азот (N)	Азот (N)	Гелій (He)
Час синтезу, сек.	45	–	45	30 хв
Об'єм рідкого середовища, мл	300	–	300	500
Міжелектродний зазор, мм.	1	1	1	1
Стан каталізатора після синтезу	Ni з ГЦК-граткою	–	Ni з ГЦК-граткою	–
Депозит	+	+	+	– (Використовували магнітний вібратор)
Посилання на працю	[57]	[100]	[57]	[113]

Сьогодні все ще залишаються маловивченими наступні аспекти електродугового синтезу вуглецевих наноструктур:

1. Не запропоновано модель процесу електродугового випаровування електродів та механізму зростання наноструктур при синтезі ВНС у рідкому середовищі;

2. Не вивчені особливості впливу рідкого середовища та типів електродів на структуру та морфологію утворюючих ВНС у процесі синтезу. Це не дозволяє враховувати вплив

природи середовища на кінетику і термодинаміку процесів синтезу ВНС;

3. Не вивчений процес поділу металевих наночастинок за розмірами фракцій;

4. Не досліджено можливість безкаталітичного синтезу нанотрубок електродуговим плазмохімічним методом;

5. Не досліджено можливість отримання графенів та графенових пакетів електродуговим плазмохімічним методом синтезу;

6. Не вивчені сполуки («X»), які утворюються та розчиняються у вуглеводневих рідких середовищах після процесу електродугового синтезу;

7. Відсутня «дорожня карта» електродугового синтезу ВНС у рідкому середовищі, що враховує різні типи електродів та рідкі середовища.

Advantages and disadvantages of electric arc methods for the synthesis of carbon nanostructures

Ol.D. Zolotarenko, M.N. Ualkhanova, E.P. Rudakova, N.Y. Akhanova, An.D. Zolotarenko, D.V. Shchur, M.T. Gabdullin, N.A. Gavrylyuk, A.D. Zolotarenko, M.V. Chymbai, I.V. Zagorulko, O.O. Havryliuk

*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Sciences of Ukraine
3 Krzhizhanovskogo Str., Kyiv, 03142, Ukraine*

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, o.d.zolotarenko@gmail.com*

*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
36 Academician Vernadsky Blvd., Kyiv, 03142, Ukraine
Kazakhstan-British Technical University
59 Tole bi Str., Almaty, 050000, Kazakhstan
NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University
71 Al-Farabi, Almaty, 050040, Kazakhstan*

A review of more than 100 contemporary literary works of domestic and foreign researchers on the issues of electric arc synthesis (EAS) of various carbon nanostructures (CNS) has been performed. EAS CNS can be performed in both gaseous and liquid media. EAS in a gaseous medium has a number of advantages, such as high productivity and velocity of the condensation process, as well as ease of control. But this method of synthesis also has disadvantages: it requires a complex vacuum and cooling system, which makes the installation very cumbersome. In addition, this method does not solve the problem of agglomeration of synthesized CNS and has a by-product of synthesis in the form of growth (deposit) on the electrode. EAS in a liquid medium is more compact equipment, as it does not require systems of vacuum (the process takes place at atmospheric pressure) and cooling (liquid medium plays the role of heat dissipation). This method of synthesis uses different types of dielectric liquids – from distilled water (H₂O), liquid nitrogen (N₂) to hydrocarbon solvents, which can serve as a source of carbon in the synthesis zone. By changing the composition of the liquid phase, it is possible to achieve the synthesis of different types of CNS. Also, this method involves the use of metal electrodes, which, in addition to long service life, can act as catalysts. The metal particles can be encapsulated CNS, forming composites with different magnetic properties. In some studies, it has been shown that mixtures of metal carbides can be formed when metal electrodes are used in the EAS process in a liquid medium. The liquid medium after EAS CNS is also of scientific interest. Probably, the liquid medium contains new modifications of soluble organic compounds, which are being researched by researchers around the world. Thus, scientists have found that after EAS in a liquid medium using graphite electrodes, the working solution (C₆H₆) changed its color. This indicates the formation of soluble organic compounds in it.

In the literature review on the basis of literature data the table of modes for industrial synthesis of single-walled CNS is created. Also, a list of modes for the creation of defective CNS as a method of increasing the area of adsorption in nanoparticles.

The solution of important problems of the EAS method is recorded: agglomeration of CNS; the problem of forming a deposit; increase productivity.

Keywords: *plasma-chemical synthesis, electric arc discharge, carbon nanostructures (CNS), carbon nanoclusters (CNC), carbon nanotubes (CNTs), cryogenic media, liquid dielectrics*

ЛІТЕРАТУРА

1. Аникина Н.С., Кривущенко О.Я., Щур Д.В. и др. Идентификация эндодральных металлофуллеренов методом *uv-vis*- спектроскопии // Proc. Of IXI nt. Conf. "Hydrogen Material Science and Chemistry of Metal Hydrides" (Sept. 5–11, 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine). – P. 848.
2. Anikina N.S., Yu Z.S., Maistrenko M.I. et al. Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials. V. 172. – New York, Boston, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2005. – P. 207.
3. Матысина З.А., Загинайченко С.Ю., Щур Д.В. Растворимость примесей в металлах, сплавах, интерметаллидах, фуллеритах. – Днепропетровск: Наука и образование, 2006. – 512 с.
4. Anikina N.S., Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Zolotareno A.D. // Proc. of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials". (2007, Sudak, Ukraine). – P. 680.
5. Anikina N.S., Schur D.V., Zaginaichenko S.Y. et al. // Proc. of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials". (Sept. 22–28, 2007, Sudak, Ukraine). – P. 676.
6. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Zolotareno A.D. Solubility and Transformation of Fullerene C₆₀ Molecule // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. – NATO Science Series, 2008. – P. 85–95.
7. Аханова Н.Е., Щур Д.В., Гаврилюк Н.А. та ін. Використання спектрів поглинання для ідентифікації ендометалофуллеренів // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 429–441.
8. Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Lysenko E.A. et al. The Forming Peculiarities of C₆₀ Molecule // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. – NATO Science for Peace and Security Series, 2008. – P. 53–65.
9. Золотаренко А.Д., Щур Д.В., Загинайченко С.Ю. и др. Открытие «Эффекта Упорядочения» мета-изомера-продукта нитрования однозамещенных бензола и его связь с реакционной способностью однозамещенных бензолов в реакциях межмолекулярного донорно-акцепторного взаимодействия с Фуллереном C₆₀ // Книга тезисов XI-ой Межд. Конф. «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов», Ялта, Крым, 2009. – С. 606–609.
10. Gavrylyuk N.A., Ahanova N.E., Shchur D.V. et al. Yttrium in fullerenes // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). – 2021. – V. 01–03. – P. 47–76.
11. Akhanova N.Ye., Shchur D.V., Pomytkin A.P. et al. Gadolinium Endofullerenes // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2021. – V. 21, N 4. – P. 2435–2445.
12. Дубовой А.Г., Перекоп А.Е., Лавренко В.А. и др. Влияние магнитного поля на фазово-структурное состояние и магнитные свойства высокодисперсных порошков Fe, полученных электроискровым диспергированием // Наносистеми, наноматеріали і нанотехнології. – 2013. – Т. 11, № 1. – С. 131–140.
13. Lavrenko V.A., Podchernyaeva I.A., Shchur D.V. et al. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases // Powder Metall. Met. Ceram. – 2018. – V. 56, N 9–10. – P. 504–511.
14. Загинайченко С.Ю., Щур Д.В., Габдуллин М.Т. и др. Особенности пиролитического синтеза и аттестации углеродных наноструктурных материалов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2018. – № 19–21. – С. 72.
15. Akhanova N.Y., Shchur D.V., Pomytkin A.P. et al. Methods for the Synthesis of Endohedral Fullerenes // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2021. – V. 21, N 4. – P. 2446–2459.
16. Akhanova N., Orazbayev S., Ualkhanova M. et al. Nanoparticles Iron of Synthesis on Field Magnetic of Influence // Journal of Nanoscience and Nanotechnology Applications. – 2019. – V. 3, N 3. – P. 1–9.
17. Golovko E.I., Zolotareno A.D., Shchur D., Zaginaichenko S.Yu. Heat Stability of Me-C Nanocomposites // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems-II. – 2011. – С. 369–379.
18. Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D., Rudakova E. et al. The Peculiarities of Nanostructures Formation in Liquid Phase // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems-II. – 2011. – С. 137–150.
19. Shulga Y.M., Martynenko V.M., Krestinin A.V. et al. Mass-spectrometric investigation of gases evolved by fluorinated single-wall carbon nanotubes during heating // Int. J. Hydrogen Energy. – 2011. – V. 36, N 1. – P. 1349–1354.
20. Schur D.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D. et al. Analysis and identification of platinum-containing nanoproducts of plasma-chemical synthesis in a gaseous medium // Phys. Sci. Technol. – 2019. – V. 6, N 1–2. – P. 46–56.
21. Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Veziroglu A. et al. Methods of theoretical calculations and of experimental researches of the system atomic hydrogen–metal // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – V. 47, N 11. – P. 7310–7327.
22. Sementsov Yu.I., Gavrylyuk N.A., Prikhod'ko G.P. et al. Properties of PTFE-MWNT composite materials // Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials. – NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology, 2007. – P. 757–763.

23. *Shchur D., Zolotareno A.D., Shul'ga Yu.M. et al.* XRD Study of Hydrogenated Fullerenes and Metals from IV–V Groups // *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems.* – 2008. – P. 805–808.
24. *Sementsov Yu.I., Gavriluk N.A., Prikhod'ko G.P., Alekseyeva T.A.* Biocompatibility of Multiwall Cnt and Nanocomposites on the Base of Polymers // *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems.* – NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2008. – P. 327–334.
25. *Шульга Ю.М., Баскаков С.А., Золотаренко А.Д. и др.* Окрашивание нанолістов оксида графена и цветные полимерные композиции на их основе // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.* – 2013. – Т. 11, № 1. – С. 161–171.
26. *Володин А.А., Золотаренко А.Д., Бельмесов А.А. и др.* Электропроводящие композиционные материалы на основе оксидов металлов и углеродных наноструктур // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.* – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 705–714.
27. *Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu T.N.* The hydrogenation process as a method of investigation of fullerene C₆₀ molecule // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2015. – V. 40, N 6. – P. 2742–2762.
28. *Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F. et al.* Experimental evaluation of total hydrogen capacity for fullerite C₆₀ // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2011. – V. 36, N 1. – P. 1143–151.
29. *Schur D.V., Lavrenko V.A.* Studies of titanium-hydrogen plasma interaction // *Vacuum.* – 1993. – V. 44, N 9. – P. 897–898.
30. *Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu., Schur D.V.* The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1995. – V. 56, N 1. – P. 1–9.
31. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu., Schur D.V.* Hydrogen solubility in alloys under pressure // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 1996. – V. 21, N 11–12. – P. 1085–1089.
32. *Lytvynenko Yu.M., Schur D.V.* Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal // *Renewable Energy.* – 1999. – V. 16, N 1. – P. 753–756.
33. *Matysina Z.A., Shchur D.V.* Phase Transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \epsilon$ in Titanium Hydride TiH_x with Increase in Hydrogen Concentration // *Russ. Phys. J.* – 2001. – V. 44, N 11. – P. 1237–1243.
34. *Матыцина З.А., Загинайченко С.Ю., Щур Д.В. и др.* Бищелочные и калиевые аланаты – перспективные накопители водорода // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE).* – 2017. – № 13–15. – С. 37.
35. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur D.V. et al.* Hydrogen Sorption Properties of Potassium Alanate // *Russ. Phys. J.* – 2018. – V. 61, N 2. – P. 253–263.
36. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur D.V. et al.* The mixed lithium-magnesium imide Li₂Mg(NH)₂ a promising and reliable hydrogen storage material // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2018. – V. 43, N 33. – P. 16092–16106.
37. *Schur D.V., Veziroglu A., Zaginaychenko S.Y. et al.* The oretical studies of lithium–aluminum amidandammoniu masperspective hydrogenstorage // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2019. – V. 44, N 45. – P. 24810–24820.
38. *Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M.T. et al.* Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2021. – V. 46, N 50. – P. 25520–25532.
39. *Shchur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu A. et al.* Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide // *Russ. Phys. J.* – 2021. – V. 64, N 1. – P. 89–103.
40. *Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur, D.V. et al.* Phase Transformations in the Mixed Lithium-Magnesium Imide Li₂Mg(NH)₂ // *Russ. Phys. J.* – 2019. – V. 61, N 12. – P. 2244–2252.
41. *Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Schur D.V., Zolotareno A.D.* Li-N-H system – Reversible accumulator and store of hydrogen // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2012. – V. 37, N 9. – P. 7565–7578.
42. *Schur D.V., Gabdullin M.T., Bogolepov V.A. et al.* Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2016. – V. 41, N 3. – P. 1811–1818.
43. *Щур Д.В., Астратов Н.С., Помяткин А.П., Золотаренко А.Д.* Защита ценных бумаг с помощью фуллеренов // VIII Международная Конференция «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». (2003, Судак, Крым, Украина). – С. 424.
44. *Tikhotskii S.A., Fokin I.V., Schur D.V.* Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2011. – V. 47, N 4. – P. 326–344.
45. *Lavrenko V.A., Shchur D.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D.* Electrochemical Synthesis of Ammonium Persulfate (NH₄)₂S₂O₈ Using Oxygen-Depolarized Porous Silver Cathodes Produced by Powder Metallurgy Methods // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2019. – V. 57, N 9. – P. 596–604.
46. *Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D., Veziroglu A. et al.* The use of ultrapure molecular hydrogen enriched with atomic hydrogen in apparatuses of artificial lung ventilation in the fight against virus COVID-19 // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2021. – V. 47, N 11. – P. 7281–7288.

47. Гнесина Г.Г., Скоруход В.В. Неорганическое материаловедение. Т. 2, Книга 2. – Материалы и технологии; Энциклопедическое издание. – Киев: Наукова думка, 2008. – 551с.
48. Радушкевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте // Журнал Физической Химии. – 1952. – Т. 26. – С. 88–95.
49. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. – 1991. – V. 354. – P. 56–58.
50. Bogolepov V.A., Schur D.V., Adeev V.M. et al. Synthesis of carbon nanotubes on the surface of carbon fibers // Proc. of 11th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials” (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). – P. 406–409.
51. Mileeva Zh.A., Bogolepov V.A., Schur D.V. et al. Hybrid 3D-nano/microstructures obtaining on the basis of pretreated carbon fibers // Proc. of 11th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials” (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). – P. 746–749.
52. Thess A., Lee R., Nikolaev P. et al. Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes // Science. – 1996. – V. 273, N 5274. – P. 483–487.
53. Rao A., Richter E., Bandow S. et al. Diameter-Selective Raman Scattering from Vibrational Modes in Carbon Nanotubes // Science. – 1996. – V. 275, N 5297. – P. 187–191.
54. Долматов В.Ю., Веретенникова М.В., Марчуков В.А., Суцев В.Г. Современные промышленные возможности синтеза наноалмазов // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 4. – С. 596–600.
55. Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N. The hydrogenation process as a method of investigation of fullerene C₆₀ molecule // Int. J. Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40, N 6. – P. 2742–2762.
56. Большая советская энциклопедия. – Москва: Советская энциклопедия, 1969–1978.
57. Sano N., Kikuchi T., Wang H. et al. Carbon nanohorns hybridized with a metal-included nanocapsule // Carbon. – 2004. – V. 42. – P. 95–99.
58. Alexandrou H., Wang N.S., Amaratunga G.A.J. Structure of carbon onions and nanotubes formed by arc in liquids // J. Chem. Phys. – 2004. – V. 120, N 2. – P. 1055–1058.
59. Kaneko T., Okada T., Hatakeyama R. Nanocarbon formation using arc discharge plasma in hydrocarbon solvents as a carbon source // XXVIIth ICPiG, Eindhoven, the Netherlands. – 2005. – P. 5.
60. Sano N. Formation of multi-shelled carbon nanoparticles by arc discharge in liquid benzene // Mater. Chem. Phys. – 2004. – V. 88, N 2–3. – P. 235–238.
61. Золотаренко О.Д., Рудакова О.П., Картель М.Т. та ін. Механізм формування вуглецевих наноструктур електродуговим методом // Поверхня. – 2020. – Т. 12(27). – С. 263–288.
62. Shchur D.V., Shulga Yu.M., Tarasov B.P., Zaginaichenko S.Yu. Some properties of materials produced by the electric arc sputtering of graphite-cobalt-nickel electrodes // Int. Conference “Carbon Nanotubes” (April 10–11, 2000, Wyndam Miami Beach, Miami, FL, USA). – P. 186.
63. Sano N., Wang H., Chhowalla M., Alexandrou I., Amaratunga G.A.J. Synthesis of carbon ‘onions’ in water // Nature. – 2001. – V. 414. – P. 506–507.
64. Дубовой А.Г., Перекос А.Е., Лавренко В.А. и др. Влияние магнитного поля на фазово-структурное состояние и магнитные свойства высокодисперсных порошков Fe, полученных электроискровым диспергированием // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2013. – Т. 11, № 1. – С. 131–140.
65. Zheng Y., Nishikita-Gano M., Xiao C., Ando T. A Novel Synthesis Method for Aligned Carbon Nanotubes in Organic Liquids // Jpn. J. Appl. Phys. – 2002. – V. 41. – P. L408.
66. Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Anikina N.S. et al. Metalcarbon nanocomposites synthesized by mechanical mixtures evaporation in electric ARC // Proc. of 11th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials” (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). – P. 778–779.
67. Lavrenko V.A., Zaginaichenko S.Yu., Shvachko N.A. et al. Encapsulated Ferromagnetic Nanoparticles in Carbon Shells // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. V. 2. – NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2011. – P. 127–135.
68. Rudakova E., Zaginaichenko S.Yu., Dubovoy A.G. et al. The Peculiarities of Nanostructures Formation in Liquid Phase // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. V. 2. – NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2011. – P. 137–150.
69. Zaginaichenko S.Yu., Perekos A.E., Schur D.V. et al. Temperature dependence of specific Magnetization of Metal-Carbon Nanocomposites synthesized by ARC discharge in Liquid // Proc. of 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (July 16–18, 2012, Malta). – P. 1720–1725.
70. Dubovoy A.G., Perekos A.E., Lavrenko V.A. et al. Effect of magnetic field on phase-structural state and magnetic properties of Fe high-dispersive powders, produced by electrospark dispersion // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2013. – V. 11, N 1. – P. 131–140.

71. *Lavrenko V.A., Podchernyaeva I.A., Shchur D.V. et al.* Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2018. – V. 56, N 9–10. – P. 504–511.
72. *Ualkhanova M., Perekos A.Y., Dubovoy A.G. et al.* The influence of magnetic field on synthesis of iron nanoparticles // *J. Nanosci. Nanotechnol. Appl.* – 2019. – V. 3, N 3. – P. 1–3.
73. *Xuesong Li, Hongwei Zhu, Bin Jiang et al.* High-yield synthesis of multi-walled carbon nanotubes by water-protected arc discharge method // *Carbon.* – 2003. – V. 41, N 8. – P. 1645–1687.
74. *Золотаренко Ал.Д.* Фізико-хімічні особливості синтезу Ме-С нанокмполітів на основі Fe та Ni. автореф. дис. ... канд. хім. наук. 02.00.04 / ПІМ НАН України. – Київ, 2014. – 22 с.
75. *Zolotarevko An.D., Zolotarevko Al.D., Schur D.V. et al.* On the processes of Carbon Nanostructures formation in Liquid Phase // *Proc. of 11th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials”*. (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). – P. 402–403.
76. *Noriaki S., Tawatchai C., Tatsuo K., Wiwut T.* Controlled synthesis of carbon nanoparticles by arc in water method with forced convective jet // *J. Appl. Phys.* – 2004. – V. 96, N 1. – P. 645.
77. *Hsin Y.L., Hwang K.C., Chen F.-R., Kai J.-J.* Production and in-situ Metal Filling of Carbon Nanotubes in Water // *Adv. Mater.* – 2001. – V. 13, N 1. – P. 830–833.
78. *Iijima S., Ichihashi T.* Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter // *Nature.* – 1993. – V. 363. – P. 603–605.
79. *Chhowalla M., Teo K.B.K., Ducati C. et al.* Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* – 2001. – V. 90, N 10. – P. 5308.
80. *Nozaki T., Kimura Y., Okazaki K., Nozaki T.* Carbon nanotubes deposition in glow barrier discharge enhanced catalytic CVD // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2002. – V. 35, N 21. – P. 2779.
81. *Endo M., Takeuchi K., Lagrashi S. et al.* The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes (PCNTs) // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1993. – V. 54, N 12. – P. 1841–1848.
82. *Cheng H.M., Li F., Su G. et al.* Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – V. 72, N 25. – P. 3282.
83. *Zaginaichenko S.Yu., Zolotarevko Al.D., Zolotarevko An.D. et al.* MetalcCarbon Nanocomposites synthesized by evaporation in electric ARC // *Proceedings of 21st Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, Tenerife*. (July 21–27, 2013, Canary Islands, Spain). – P. 913–914.
84. *Zhu H.W., Li X.S., Jiang B. et al.* Formation of carbon nanotubes in water by the electric-arc technique // *Chem. Phys. Lett.* – 2002. – V. 366, N 5–6. – P. 664–669.
85. *Sano N., Wang H., Alexandrou I. et al.* Properties of carbon onions produced by an arc discharge in water // *J. Appl. Phys.* – 2002. – V. 92, N 5. – P. 2783.
86. *Sano N., Naito M., Chhowalla M. et al.* Pressure effects on nanotubes formation using the submerged arc in water method // *Chem. Phys. Lett.* – 2003. – V. 378, N 1–2. – P. 29.
87. *Абдуллин Х.А., Габдуллин М.Т., Рамазанов Т.С. и др.* Синтез нанопорошков железа в водно-спиртовой среде хлорида железа // *Вестник. Серия Физическая (ВКФ)*. – 2015. – Т. 52, № 1. – С. 46–51.
88. *Antisari M.V., Marazzi R., Krsmanovic R.* Synthesis of multi-walled carbon nanotubes by electric arc discharge in liquid environments // *Carbon.* – 2003. – V. 41. – P. 2393.
89. *Lange H., Sioda M., Huczko A. et al.* Nanocarbon production by arc discharge in water // *Carbon.* – 2003. – V. 41, N 8. – P. 1617–1623.
90. *Biro L.P., Horvath Z.E., Szalmas L. et al.* Continuous carbon nanotube production in underwater AC electric arc // *Chem. Phys. Lett.* – 2003. – V. 372, N 3–4. – P. 399–402.
91. *Qiu J.S., Zhou Y., Yang Z.G. et al.* Preparation of fullerenes using carbon rods manufactured from Chinese hard coals // *Fuel.* – 2000. – V. 79, N 11. – P. 1303.
92. *Qiu J.S., Zhang F., Zhou Y. et al.* Carbon nanomaterials from eleven caking coals // *Fuel.* – 2002. – V. 81, N 11–12. – P. 1509–1514.
93. *Qiu J.S., Zhou Y., Wang L.N., Tsang S.C.* Formation of carbon nanotubes and encapsulated nanoparticles from coals with moderate ash contents // *Carbon.* – 1998. – V. 36, N 4. – P. 465.
94. *Qiu J.S., Li Y.F., Wang Y.P. et al.* High-purity single-walled carbon nanotubes synthesized from coal by arc discharge // *Carbon.* – 2003. – V. 41, N 11. – P. 2170–2173.
95. *Qiu J., Li Y., Wang Y., Zhao Z. et al.* Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water // *Fuel.* – 2004. – V. 83, N 4. – P. 615–617.
96. *Золотаренко Ол.Д., Рудакова О.П., Аханова Н.Е. та ін.* Фуллерени та вуглецеві наноструктури, отримані з графіту марок ЕГСП та МПГ-7 // *Матеріали III Всеукраїнської Конференції Молодих Учених «Сучасне Матеріалознавство. Матеріали та Технології СММТ-2021»* (19–20 жовтня, 2021, Київ, Україна). – С. 17.
97. *Koprinarov N.S., Constantinova M.A., Pchelarov G.V., Marinov M.V.* Carbon macrostructures obtained at AC arc discharge // *J. Cryst. Growth.* – 1997. – V. 171, N 1–2. – P. 111–118.

98. *Ishigami M., Cumings J., Zettl A., Chen S.* Method for the Continuous Production of Carbon Nanotubes // *Chem. Phys. Lett.* – 2000. – V. 319, N 5–6. – P. 457–459.
99. *Lange H., Saidane K., Razafinimanana M.* Temperatures and C₂ column densities in a carbon arc plasma // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1999. – V. 32, N 9. – P. 1024–1030.
100. *Nakano J., Kanki J., Sano N.* Synthesis of single-walled carbon nanotubes with nanohorns by arc in liquid nitrogen // *Carbon.* – 2004. – V. 42, N 3. – P. 667–691.
101. *Sano N., Ukita S.I.* One-step synthesis of Pt-supported carbon nanohorns for fuel cell electrode by arc plasma in liquid nitrogen // *Mater. Chem. Phys.* – 2006. – V. 38, N 34. – P. 447–450.
102. *Zolotareno A.D., Schur D.V., Zolotareno A.L.D. et al.* Analysis and identification of platinum-containing nanoprecipitates of plasma-chemical synthesis in a gaseous medium // *Current Trends in Chemical Engineering and Technology.* – 2018. – V. 2018, N 1. – P. 1–12.
103. *Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Zolotareno A.L.D. et al.* Synthesis of platinum-containing Carbon Nanostructures // *Proc. of 9th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials”* (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine). – P. 1014–1016.
104. *Zolotareno A.L.D., Zolotareno An-y.D., Zolotareno A.L.D. et al.* Platinum-containing Nanostructural Carbon Material for fuel cells. Abstracts of International Conference on Carbon “Carbon’05” (July 3–7, 2005, Gyeongju, Korea). – P. 90.
105. *Prabhuram J., Zhao T.S., Wong C.W., Guo J.W.* Synthesis and physical/electrochemical characterization of Pt/C nanocatalyst for polymer electrolyte fuel cells // *Journal of Power Sources.* – 2004. – V. 134, N 1. – P. 1–6.
106. *Mil’to O.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.L.D. et al.* Deposition of Catalyst-containing Carbon Nanostructures on proton-conducting polymer membranes by electrophoresis // *Proc. of 9th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials”* (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine). – P. 1074–1075.
107. *Matsumoto T., Komatsu T., Arai K. et al.* Reduction of Pt usage in fuel cell electrocatalysts with carbon nanotube electrodes // *Chem. Commun. (Camb).* – 2004. – N 7. – P. 840–841.
108. *Yoshitake T., Shimakawa Y., Kuroshima S. et al.* Preparation of fine platinum catalyst supported on single-wall carbon nanohorns for fuel cell application // *Physica B.* – 2002. – V. 323, N 1–4. – P. 124–126.
109. *Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Zolotareno A.L.D. et al.* Synthesis of Endofullerens with ARC Method // *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies.* – 2005. – V. 3, N 4. – P. 1133–1144.
110. *Zolotareno An.D., Zolotareno A.L.D., Perekos A.E. et al.* Properties of Iron and Nickel Metal-Carbon Nanocomposites synthesized by ARC discharge in Liquid // *Proc. of 11th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials”* (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). – P. 772–774.
111. *Zolotareno A.D., Volodin A.A., Schur D.V. et al.* Noncatalytic synthesis of Carbon Nanostructures. Fullerenes and fullerene-like structures in condensed mediums // *Proc. of Int. Symposium. (2011, Minsk: BSU).* – P. 286–291.
112. *Zolotareno O.D., Volodin O.O., Schur D.V. et al.* Synthesis of Carbon Nanostructures by Noncatalytic Method // *II Conference of young scientists “Reality and prospects of materials science 2011”.* (2011, Kyiv). – P. 137.
113. *Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu. et al.* Synthesis of Carbon Nanostructures in Liquid Helium // *Proc. of 9th International Conference “Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials”.* (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine).
114. *Biró L.P., Horváth Z.E., Szalmás L. et al.* Continuous carbon nanotube production in underwater AC electric arc // *Chem. Phys. Lett.* – 2003. – V. 372, N 3–4. – P. 399–402.
115. *Bera D., Brinley E., Kuiry S.C. et al.* Optoelectronically automated system for carbon nanotubes synthesis via arc-discharge in solution // *Rev. Sci. Instrum.* – 2005. – V. 76, N 3. – P. 033903.
116. *Shenli J., Xing G., Xu Q., Shi Z.* Influence of Magnetic Field on Carbon Nano-materials Produced in Liquid Arc // *1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. IEEE.* – 2006. – P. 10312046.
117. *Zolotareno O.L.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y. et al.* Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures // *Phys. Met. Adv. Technol.* – 2021. – V. 43, N 10. – P. 1417–1430.
118. *Zolotareno O.L., Rudakova E., Zolotareno An. et al.* New composites based on carbon nanostructures and solid polymers for 3D printing technology FDM // *IX International Scientific and Practical Conference “TRENDS OF DEVELOPMENT MODERN SCIENCE AND PRACTICE”.* (November 16–19, 2021, Stockholm, Sweden). – P. 107–113.
119. *Zolotareno A.L.D., Zolotareno An.D., Sementsov Y.I. et al.* Influence of carbon nanostructures on the mechanical characteristics of a composite based on solid polymers for 3D printing technology (FDM) // *7th International Materials Science Conference HighMatTech-2021* (October 5–7, 2021, Kyiv, Ukraine). – P. 13.

REFERENCES

1. Anikina N.S., Krivushhenko O.Ya., Schur D.V., Zaginajchenko S.Yu., Chuprov S.S., Mil'to K.A., Zolotareno A.D. Identification of endohedral metallofullerenes by uv-vis spectroscopy. In: *Proc. Of IX Int. Conf. "Hydrogen Material Science and Chemistry of Metal Hydrides"* (Sept. 5–11, 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine). P. 848. [in Russian].
2. Anikina N.S., Yu Z.S., Maistrenko M.I., Zolotareno A.D., Sivak G.A., Schur D.V. *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials*. V. 172. (New York, Boston, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2005). P. 207.
3. Matysina Z.A., Zaginaychenko S.Yu., Schur D.V. *Solubility of Impurities in Metals, Alloys, Intermetallics, Fullerenes*. (Dnepropetrovsk: Naukaiobrazovanie, 2006). [in Russian].
4. Anikina N.S., Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Zolotareno A.D. In: *Proc. of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (Sudak, Ukraine, 2007). P. 680.
5. Anikina N.S., Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Zolotareno A.D., Krivushenko O.Ya. *Proc. of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (Sept. 22–28, 2007, Sudak, Ukraine, 2007). P. 676.
6. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Zolotareno A.D. Solubility and Transformation of Fullerene C₆₀ Molecule. *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. (NATO Science Series, 2008). P. 85.
7. Akhanova N.Y., Schur D.V., Gavrylyuk N.A., Gabdullin M.T., Anikina N.S., Zolotareno An.D., Krivushchenko O.Ya., Zolotareno Ol.D., Gorelov B.M., Erlanuli E., Batrishev D.G. Use of absorption spectra for identification of endometallofullerenes. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2020. **11**(3): 429. [in Ukrainian].
8. Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Lysenko E.A., Golovchenko T.N., Javadov N.F. The Forming Peculiarities of C₆₀ Molecule. *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. (NATO Science for Peace and Security Series, 2008). P. 53.
9. Zolotareno A.D., Schur D.V., Zaginajchenko S.Yu., Anikina N.S., Matysina Z.A., Krivushhenko O.Ya., Skorohod V.V., Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D. Knigatezisov XI-og Mezhd. Konf. "Vodorodnoe materialovedenie i himija uglerodnyh nanomaterialov". (2009, Jalta, Krym, Ukraina). P. 606. [in Russian].
10. Gavryljuk N.A., Ahanova N.E., Shhur D.V., Pomytkin A.P., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D. Yttrium in fullerenes. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2021. **01–03**: 47.
11. Akhanova N.Ye., Shchur D.V., Pomytkin A.P., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Gavrylyuk N.A., Ualkhanova M., Bo W., Ang D. Gadolinium Endofullerenes. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2021. **21**(4): 2435.
12. Dubovoj A.G., Perekos A.E., Lavrenko V.A., Rudenko Yu.M., Efimova T.V., Zalustkii V.P., Rushitskaya T.V., Kotko A.V., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D. Effect of a Magnetic Field on the Phase-Structural State and Magnetic Properties of Finely Dispersed Fe Powders Obtained by Electrospark Dispersion. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 2013. **11**(1): 131. [in Russian].
13. Lavrenko V.A., Podchernyaeva I.A., Shchur D.V., Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2018. **56**(9–10): 504.
14. Zaginajchenko S.Yu., Schur D.V., Gabdullin M.T., Dzhavadov N.F., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Zolotareno A.D., Mamedova S.H., Omarova G.D., Mamedova Z.T. Features of pyrolytic synthesis and certification of carbon nanostructured materials. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2018. **(19–21)**:72. [in Russian].
15. Akhanova N.Y., Shchur D.V., Pomytkin A.P., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Gavrylyuk N.A., Ualkhanova M., Bo W., Ang D. Methods for the Synthesis of Endohedral Fullerenes. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2021. **21**(4): 2446.
16. Akhanova N., Orazbayev S., Ualkhanova M., Perekos A.Y., Dubovoy A.G., Schur D.V., Zolotareno Al.D., Zolotareno An.D., Gavrylyuk N.A., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S. Nanoparticles Iron of Synthesis on Field Magnetic of Influence. *J. Nanosci. Nanotechnol. Appl.* 2019. **3**(3): 1.
17. Golovko E.I., Zolotareno A.D., Shchur D., Zaginaichenko S.Yu. Heat Stability of Me-C Nanocomposites. *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems-II*. 2011: 369.
18. Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D., Rudakova E., Zaginaichenko S.Yu., Dubovoy A.G., Schur D.V., Lavrenko V.A., Pomytkin A.P., Perekos A.E., Zalutskiy V.P., Divizinyuk M.M., Azarenko E.V., Tarasenko Yu.A. The Peculiarities of Nanostructures Formation in Liquid Phase. *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems-II*. 2011: 137.

19. Shulga Y.M., Martynenko V.M., Krestinin A.V., Kharitonov A.P., Davidova G.I., Knerelman E.I., Krastev V.I., Schur D.V. Mass-spectrometric investigation of gases evolved by fluorinated single-wall carbon nanotubes during heating. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2011. **36**(1): 1349.
20. Schur D.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Zolotareno O.P., Chimbai M.V., Akhanova N.Y., Sultangazina M., Zolotareno E.P. Analysis and identification of platinum-containing nanoproducs of plasma-chemical synthesis in a gaseous medium. *Phys. Sci. Technol.* 2019. **6**(1–2): 46.
21. Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.n.D., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Shvachko N.A., Pomytkin A.P., Schur D.V., Gavrylyuk N.A., Ramazanov T.S., Akhanova, N.Y., Gabdullin M.T. Methods of theoretical calculations and of experimental researches of the system atomic hydrogen–metal. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. **47**(11): 7310.
22. Sementsov Yu.I., Gavrylyuk N.A., Prikhod'ko G.P., Melezhyk A.V., Pyatkovsky M.L., Yanchenko V.V., Revo S.L., Ivanenko E.A., Senkevich A.I. Properties of PTFE-MWNT composite materials. In: *Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials*. (NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology, 2007). P. 757.
23. Shchur D., Zolotareno A.D., Shul'ga Yu.M., Timofeeva I.I., Zolotareno A.D., Rogozinskaya A.A., Klochkov L.A., Savenko A.F., Simanovskiy A.P., Sheshin E.P. XRD Study of Hydrogenated Fullerites and Metals from IV–V Groups. In: *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2008). P. 805.
24. Sementsov Yu.I., Gavriluk N.A., Prikhod'ko G.P., Aleksyeyeva T.A. Biocompatibility of Multiwall Cnt and Nanocomposites on the Base of Polymers. In: *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2008). P. 327.
25. Shulga Yu.M., Baskakov S.A., Zolotareno A.D., Kabachkov E.N., Muradian V.E., Voilov D.N., Smirnov V.A., Martynenko V.M., Schur D.V., Pomytkin A.P. Coloring graphene oxide nanosheets and colored polymer compositions based on them. *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*. 2013. **11**(1): 161. [in Russian].
26. Volodin A.A., Zolotareno A.D., Bel'mesov A.A., Gerasimova E.V., Schur D.V., Tarasov V.R., Zaginaichenko S.Yu., Doroshenko S.V., Zolotareno A.n.D., Zolotareno A.I.D. Conductive Composite Materials Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures. *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*. 2014. **12**(4): 705. [in Russian].
27. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu T.N. The hydrogenation process as a method of investigation of fullerene C₆₀ molecule. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. **40**(6): 2742.
28. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Bogolepov V.A., Anikina N.S., Zolotareno A.D., Matysina Z.A., Veziroglu N., Scryabina N.E. Experimental evaluation of total hydrogen capacity for fullerite C₆₀. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2011. **36**(1): 1143.
29. Schur D.V., Lavrenko V.A. Studies of titanium-hydrogen plasma interaction. *Vacuum*. 1993. **44**(9): 897.
30. Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu., Schur D.V. The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys. *J. Phys. Chem. Solids*. 1995. **56**(1): 1.
31. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu., Schur D.V. Hydrogen solubility in alloys under pressure. *Int. J. Hydrogen Energy*. 1996. **21**(11–12): 1085.
32. Lytvynenko Yu.M., Schur D.V. Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal. *Renewable Energy*. 1999. **16**(1): 753.
33. Matysina Z.A., Shchur D.V. Phase Transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \epsilon$ in Titanium Hydride TiH_x with Increase in Hydrogen Concentration. *Russ. Phys. J.* 2001. **44**(11): 1237.
34. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Shchur D.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.I.D., Gabdullin T.M. Bi-alkaline and potassium alanates are promising hydrogen accumulators. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2017. **(13–15)**: 37.
35. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur D.V., Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.n.D., Gabdullin M.T. Hydrogen Sorption Properties of Potassium Alanate. *Russ. Phys. J.* 2018. **61**(2): 253.
36. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur D.V., Veziroglu T.N., Veziroglu A., Gabdullin M.T., Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.n.D. The mixed lithium-magnesium imide Li₂Mg(NH)₂ a promising and reliable hydrogen storage material. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. **43**(33): 16092.
37. Schur D.V., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno A.n.D., Zolotareno A.I.D. Theoretical studies of lithium–aluminum amidandammonium asperspective hydrogenstorage. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. **44**(45): 24810.
38. Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M.T., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Pomytkin A.P., Schur D.V., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Zolotareno A.n.D., Zolotareno A.I.D., Shvachko N.A. Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. **46**(50): 25520.

39. Shchur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Gavrylyuk N.A., Zolotarenko A.D., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotarenko A.I.D., Zolotarenko An.D. Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide. *Russ. Phys. J.* 2021. **64**(1): 89.
40. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y., Schur D.V., Zolotarenko A.I.D., Zolotarenko An.D., Gabdulin M.T., Kopylova L.I., Shaposhnikova T.I. Phase Transformations in the Mixed Lithium-Magnesium Imide $\text{Li}_2\text{Mg}(\text{NH})_2$. *Russ. Phys. J.* 2019. **61**(12): 2244.
41. Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Schur D.V., Zolotarenko A.D. Li-N-H system – Reversible accumulator and store of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2012. **37**(9): 7565.
42. Schur D.V., Gabdullin M.T., Bogolepov V.A., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Yu., Savenko A.F., Meleshevich K.A. Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2016. **41**(3): 1811.
43. Shchur D.V., Astratov N.S., Pomytkin A.P., Zolotarenko A.D. Protection of securities with the help of fullerenes. In: *VIII International Conference "Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials"*. (2003, Sudak, Crimea, Ukraine). P. 424.
44. Tikhotskii S.A., Fokin I.V., Schur D.V. Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2011. **47**(4): 326.
45. Lavrenko V.A., Shchur D.V., Zolotarenko A.D., Zolotarenko A.D. Electrochemical Synthesis of Ammonium Persulfate $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ Using Oxygen-Depolarized Porous Silver Cathodes Produced by Powder Metallurgy Methods. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2019. **57**(9): 596.
46. Zolotarenko An.D., Zolotarenko A.I.D., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Shvachko N.A., Pomytkin A.P., Gavrylyuk N.A., Schur D.V., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T. The use of ultrapure molecular hydrogen enriched with atomic hydrogen in apparatuses of artificial lung ventilation in the fight against virus COVID-19. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. **47**(11): 7281.
47. Hnesyna H.H., Skorohod V.V. *Inorganic materials science. V. 2, Book 2. – Materials and technologies: Encyclopedic edition.* (Kyiv: Naukova dumka, 2008). [in Russian].
48. Radushkevych L.V., Lukianovych B.M. On the structure of carbon formed during the thermal decomposition of carbon monoxide on an iron contact. *J. Phys. Chem.* 1952. **26**: 88. [in Russian].
49. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature.* 1991. **354**: 56.
50. Bogolepov V.A., Schur D.V., Adeev V.M., Golovchenko T.N., Voronaya T.V., Kotko A.V., Lysenko E.A. Synthesis of carbon nanotubes on the surface of carbon fibers. In: *Proc. of 11' International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"* (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). P. 406.
51. Mileeva Zh.A., Bogolepov V.A., Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Begenev V.A., Shabalin I.L., Ross D.K. Hybrid 3D-nano/microstructures obtaining on the basis of pretreated carbon fibers. In: *Proc. of 11' International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). P. 746.
52. Thess A., Lee R., Nikolaev P., Dai H., Petit P., Robert J., Xu C., Lee Y.-H., Kim S.-G., Rinzler A.G., Colbert D.T., Scuser G.E., Tomanek D., Fisher J.E., Smalley R.E. Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes. *Science.* 1996. **273**(5274): 483.
53. Rao A., Richter E., Bandow S., Chase B., Eklund P.C., Williams K.A., Fang S., Subbaswamy K.R., Menon M., Thess A., Smalley R.E., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. Diameter-Selective Raman Scattering from Vibrational Modes in Carbon Nanotubes. *Science.* 1996. **275**(5297): 187.
54. Dolmatov V.Yu., Veretennykova M.V., Marchukov B.A., Sushchev V.H. Modern industrial possibilities for the synthesis of nanodiamonds. *Solid State Physics.* 2004. **46**(4): 596.
55. Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N. The hydrogenation process as a method of investigation of fullerene C_{60} molecule. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2015. **40**(6): 2742.
56. *Great Soviet Encyclopedia.* (Moscow: Soviet Encyclopedia, 1969–1978).
57. Sano N., Kikuchi T., Wang H., Chhowalla M.G., Amaratunga A.J. Carbon nanohorns hybridized with a metal-included nanocapsule. *Carbon.* 2004. **42**: 95.
58. Alexandrou H., Wang N.S., Amaratunga G.A.J. Structure of carbon onions and nanotubes formed by arc in liquids. *J. Chem. Phys.* 2004. **120**(2): 1055.
59. Kaneko T., Okada T., Hatakeyama R. Nanocarbon formation using arc discharge plasma in hydrocarbon solvents as a carbon source. *XXVIIth ICPIG.* (Eindhoven, the Netherlands, 2005). P. 5.
60. Sano N. Formation of multi-shelled carbon nanoparticles by arc discharge in liquid benzene. *Mater. Chem. Phys.* 2004. **88**(2–3): 235.
61. Zolotarenko O.D., Rudakova O.P., Kartel M.T., Kaleniuk H.O., Zolotarenko A.D., Schur D.V., Tarasenko Yu.O. The mechanism of forming carbon nanostructures by electric arc-method. *Surface.* 2020. **12**(27): 263. [in Ukrainian].

62. Shchur D.V., Shulga Yu.M., Tarasov B.P., Zaginaichenko S.Yu. Some properties of materials produced by the electric arc sputtering of graphite-cobalt-nickel electrodes. In: *Int. Conference "Carbon Nanotubes"*. (April 10–11, 2000, Wyndam Miami Beach, Miami, FL, USA). P. 186.
63. Sano N., Wang H., Chhowalla M., Alexandrou I., Amaratunga G.A.J. Synthesis of carbon 'onions' in water. *Nature*. 2001. **414**: 506.
64. Dubovoi A.H., Perekos A.E., Lavrenko V.A., Rudenko Yu.M., Efymova T.V., Zalutskiy V.P., Ruzhytskaia T.V., Kotko A.V., Zolotarenko Al.D., Zolotarenko An.D. Effect of a Magnetic Field on the Phase-Structural State and Magnetic Properties of Finely Dispersed Fe Powders Obtained by Electrospray Dispersion. *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*. 2013. **11**(1): 131.
65. Zheng Y., Nishikita-Gano M., Xiao C., Ando T. A Novel Synthesis Method for Aligned Carbon Nanotubes in Organic Liquids. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2002. **41**: L408.
66. Zolotarenko Al.D., Zolotarenko An.D., Anikina N.S., Krivushchenko O.Ya., Golovko E.I., Zaginaichenko S.Yu. Metalcarbon nanocomposites synthesized by mechanical mixtures evaporation in electric ARC. In: *Proc. of 11th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). P. 778.
67. Lavrenko V.A., Zaginaichenko S.Yu., Shvachko N.A., Milto O.V., Molodkin V.B., Perekos A.E., Nadutov V.M., Tarasenko Yu.A., Zolotarenko Al.D., Zolotarenko An.D. Encapsulated Ferromagnetic Nanoparticles in Carbon Shells. *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. V. 2. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2011). P. 127.
68. Rudakova E., Zaginaichenko S.Yu., Dubovoy A.G., Schur D.V., Perekos A.E., Zalutskiy V.P., Divizinyuk M.M., Azarenko E.V., Tarasenko Yu.A., Zolotarenko An.D., Zolotarenko Al.D. The Peculiarities of Nanostructures Formation in Liquid Phase. In: *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems*. V. 2. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2011). P. 137.
69. Zaginaichenko S.Yu., Perekos A.E., Schur D.V., Dubovoy A.G., Zolotarenko A.D., Zolotarenko An.D., Zolotarenko Al.D., Kotko A.V., Efimova T.V., Zalutskiy V.P., Rugitskaya T.V. Temperature dependence of specific Magnetization of Metal-Carbon Nanocomposites synthesized by ARC discharge in Liquid. In: *Proc. of 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. (July 16–18, 2012, Malta). P. 1720.
70. Dubovoy A.G., Perekos A.E., Lavrenko V.A., Rudenko Y.M., Efimova T.V., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Kotko A.V., Zolotarenko Al.D., Zolotarenko An.D. Effect of magnetic field on phase-structural state and magnetic properties of Fe high-dispersive powders, produced by electrospray dispersion. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 2013. **11**(1): 131.
71. Lavrenko V.A., Podchernyaeva I.A., Shchur D.V., Zolotarenko An.D., Zolotarenko Al.D. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2018. **56**(9–10): 504.
72. Ualkhanova M., Perekos A.Y., Dubovoy A.G., Schur D.V., Zolotarenko Al.D., Zolotarenko An.D., Gavrylyuk N.A., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Akhanova N., Orazbayev S. The influence of magnetic field on synthesis of iron nanoparticles. *J. Nanosci. Nanotechnol. Appl.* 2019. **3**(3): 1.
73. Xuesong Li, Hongwei Zhu, Bin Jiang, Jun Ding, Cailu Xu, Dehai Wu. High-yield synthesis of multi-walled carbon nanotubes by water-protected arc discharge method. *Carbon*. 2003. **41**(8): 1645.
74. Zolotarenko Al.D. PhD (Chem.) Thesis. (Kyiv, 2014). [in Ukrainian].
75. Zolotarenko An.D., Zolotarenko Al.D., Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Dubovoy A.G. On the processes of Carbon Nanostructures formation in Liquid Phase. In: *Proc. of 11th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). P. 402.
76. Noriaki S., Tawatchai C., Tatsuo K., Wiwut T. Controlled synthesis of carbon nanoparticles by arc in water method with forced convective jet. *J. Appl. Phys.* 2004. **96**(1): 645.
77. Hsin Y.L., Hwang K.C., Chen F.-R., Kai J.-J. Production and in-situ Metal Filling of Carbon Nanotubes in Water. *Adv. Mater.* 2001. **13**(1): 830.
78. Iijima S., Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*. 1993. **363**: 603.
79. Chhowalla M., Teo K.B.K., Ducati C., Rupesinghe N.L., Amaratunga G.A.J., Ferrari A.C., Roy D., Robertson J., Milne W.I. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition. *J. Appl. Phys.* 2001. **90**(10): 5308.
80. Nozaki T., Kimura Y., Okazaki K., Nozaki T. Carbon nanotubes deposition in glow barrier discharge enhanced catalytic CVD. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002. **35**(21): 2779.
81. Endo M., Takeuchi K., Lagrashi S., Kobori K., Shiraiishi M., Kroto H.W. The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes (PCNTs). *J. Phys. Chem. Solids*. 1993. **54**(12): 1841.

82. Cheng H.M., Li F., Su G., Pan H.Y., He L.L., Sun X., Dresselhaus M.S. Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons. *Appl. Phys. Lett.* 1998. **72**(25): 3282.
83. Zaginaichenko S.Yu., Zolotarenko A.I.D., Zolotarenko An.D., Schur D.V., Anikina N.S., Krivushchenko O.Ya., Magrez A., Baibarac M. Metalcarbon Nanocomposites synthesized by evaporation in electric ARC. In: *Proceedings of 21st Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, Tenerife.* (July 21–27, 2013, Canary Islands, Spain). P. 913.
84. Zhu H.W., Li X.S., Jiang B., Xu C.L., Zhu Y.F., Wu D.H., Chen X.H. Formation of carbon nanotubes in water by the electric-arc technique. *Chem. Phys. Lett.* 2002. **366**(5–6): 664.
85. Sano N., Wang H., Alexandrou I., Chhowalla M., Teo K.B.K., Amaratunga G.A.J., Iimura K. Properties of carbon onions produced by an arc discharge in water. *J. Appl. Phys.* 2002. **92**(5): 2783.
86. Sano N., Naito M., Chhowalla M., Kikuchi T., Matsuda S., Iimura K., Wang H., Kanki T., Amaratunga G.A.J. Pressure effects on nanotubes formation using the submerged arc in water method. *Chem. Phys. Lett.* 2003. **378**(1–2): 29.
87. Abdullin Kh.A., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Batryshev D.G., Ismailov D.V., Schur D.V., Kerimbekov D.S. The synthesis of iron nanoparticles in the hydro-alcoholic solution of ferric chloride. *Recent Contributions to Physics.* 2015. **52**(1): 46. [in Russian].
88. Antisari M.V., Marazzi R., Krsmanovic R. Synthesis of multi-walled carbon nanotubes by electric arc discharge in liquid environments. *Carbon.* 2003. **41**: 2393.
89. Lange H., Sioda M., Huczko A., Zhu Y.Q., Kroto H.W., Walton D.R.M. Nanocarbon production by arc discharge in water. *Carbon.* 2003. **41**(8): 1617.
90. Biro L.P., Horvath Z.E., Szalmas L., Kertesz K., Weber F., Juhasz G., Radnoci G., Gyulai J. Continuous carbon nanotube production in underwater AC electric arc. *Chem. Phys. Lett.* 2003. **372**(3–4): 399.
91. Qiu J.S., Zhou Y., Yang Z.G., Guo S.C., Tsang S.C., Harris P.J.F. Preparation of fullerenes using carbon rods manufactured from Chinese hard coals. *Fuel.* 2000. **79**(11): 1303.
92. Qiu J.S., Zhang F., Zhou Y., Han H.M., Hu D.S., Tsang S.C., Harris P.J.F. Carbon nanomaterials from eleven caking coals. *Fuel.* 2002. **81**(11–12): 1509.
93. Qiu J.S., Zhou Y., Wang L.N., Tsang S.C. Formation of carbon nanotubes and encapsulated nanoparticles from coals with moderate ash contents. *Carbon.* 1998. **36**(4): 465.
94. Qiu J.S., Li Y.F., Wang Y.P., Wang T.H., Zhao Z.B., Zhou Y., Li F., Cheng H.M. High-purity single-walled carbon nanotubes synthesized from coal by arc discharge. *Carbon.* 2003. **41**(11): 2170.
95. Qiu J., Li Y., Wang Y., Zhao Z., Zhou Y., Wang Y. Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water. *Fuel.* 2004. **83**(4): 615.
96. Zolotarenko O.I.D., Rudakova O.P., Akhanova N.E., Ualkhanova M., Zolotarenko An.D., Zolotarenko O.D., Habdullin M.T., Chymbai M.V., Havryliuk N.A., Shechur D.V., Zahorulko I.V. Fullerenes and carbon nanostructures derived from EGSP and MPG-7 graphite. In: *Proceedings of the III All-Ukrainian Conference of Young Scientists "Modern Materials Science. Materials and Technologies SMMT-2021"*. (October 19–20, 2021, Kyiv, Ukraine). P. 17. [in Ukrainian].
97. Koprinarov N.S., Constantinova M.A., Pchelarov G.V., Marinov M.V. Carbon macrostructures obtained at AC arc discharge. *J. Cryst. Growth.* 1997. **171**(1–2): 111.
98. Ishigami M., Cumings J., Zettl A., Chen S. Method for the Continuous Production of Carbon Nanotubes. *Chem. Phys. Lett.* 2000. **319**(5–6): 457.
99. Lange H., Saidane K., Razafinimanana M. Temperatures and C₂ column densities in a carbon arc plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1999. **32**(9): 1024.
100. Nakano J., Kanki J., Sano N. Synthesis of single-walled carbon nanotubes with nanohorns by arc in liquid nitrogen. *Carbon.* 2004. **42**(3): 667.
101. Sano N., Ukita S.I. One-step synthesis of Pt-supported carbon nanohorns for fuel cell electrode by arc plasma in liquid nitrogen. *Mater. Chem. Phys.* 2006. **38**(34): 447.
102. Zolotarenko An.D., Schur D.V., Zolotarenko A.I.D., Chimbai M.V., Zolotarenko O.P., Zolotarenko A.D. Analysis and identification of platinum-containing nanoprecipitates of plasma-chemical synthesis in a gaseous medium. *Current Trends in Chemical Engineering and Technology.* 2018. **2018**(1): 1.
103. Zolotarenko A.D., Zolotarenko A.D., Zolotarenko A.I.D., Vojchuk G.A., Adeev V.M., Kotko A.V., Koval A.Yu., Firstov S.A., Schur D.V., Milto O.V., Zaginaichenko S.Yu., Golovko E.I. Synthesis of platinum-containing Carbon Nanostructures. In: *Proc. of 9th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine). P. 1014.
104. Zolotarenko A.I.D., Zolotarenko An-y.D., Zolotarenko A.I.D., Zaginaichenko S.Yu., Adeev V.M., Schur D.V., Kotko A.V., Golovko E.I. Platinum-containing Nanostructural Carbon Material for fuel cells. In: *International Conference on Carbon "Carbon'05"*. (July 3–7, 2005, Gyeongju, Korea). P. 90.

105. Prabhuram J., Zhao T.S., Wong C.W., Guo J.W. Synthesis and physical/electrochemical characterization of Pt/C nanocatalyst for polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2004. **134**(1): 1.
106. Mil'to O.V., Zolotareno A.D., Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.N.D., Shaposhnikova T.I., Khotynenko N.G., Adejev V.M., Kotko A.V., Zaginaichenko S.Yu., Schur D.V. Deposition of Catalyst-containing Carbon Nanostructures on proton-conducting polymer membranes by electrophoresis. In: *Proc. of 9th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine). P. 1074.
107. Matsumoto T., Komatsu T., Arai K., Yamazaki T., Kijima M., Shimizu H., Takasawa Y., Nakamura J. Reduction of Pt usage in fuel cell electrocatalysts with carbon nanotube electrodes. *Chem. Commun. (Camb)*. 2004. **7**: 840.
108. Yoshitake T., Shimakawa Y., Kuroshima S., Kimura H., Ichihashi T., Kubo Y., Kasuya D., Takahashi K., Kokai F., Yudasaka M., Iijima S. Preparation of fine platinum catalyst supported on single-wall carbon nanohorns for fuel cell application. *Physica B*. 2002. **323**: 124.
109. Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Voychuk G.A., Adeev V.M., Briefly A.V., Koval A.U., Firstov S.A., Schur D.V., Milto O.V., Zaginaichenko S.Y., Golovko E.I. Synthesis of Endofullerens with ARC Method. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 2005. **3**(4): 1133.
110. Zolotareno A.N.D., Zolotareno A.I.D., Perekos A.E., Dubovoy A.G., Kotko A.V., Efimova T.V., Zalutskiy V.P., Rugitskaya T.V., Zaginaichenko S.Yu. Properties of Iron and Nickel Metal-Carbon Nanocomposites synthesized by ARC discharge in Liquid. In: *Proc. of 11th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine). P. 772.
111. Zolotareno A.D., Volodin A.A., Schur D.V., Tarasov B.P., Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.N.D., Rudakova E.P. Noncatalytic synthesis of Carbon Nanostructures. Fullerenes and fullerene-like structures in condensed mediums. *Proc. of Int. Symposium*. (2011, Minsk: BSU). P. 286.
112. Zolotareno O.D., Volodin O.O., Schur D.V., Tarasov B.P., Zolotareno O.I.D., Zolotareno A.N.D., Rudakov O.P. Synthesis of Carbon Nanostructures by Noncatalytic Method. In: *II conference of young scientists "Reality and prospects of materials science 2011"*. (2011, Kyiv). P. 137.
113. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Kotko A.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F., Zolotareno A.D., Zolotareno A.N.D., Zolotareno A.I.D. Synthesis of Carbon Nanostructures in Liquid Helium. In: *Proc. of 9th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"*. (September 5–11, 2005, Sevastopol, Ukraine).
114. Biró L.P., Horváth Z.E., Szalmás L., Kertész K., Wéber F., Juhász G., Radnóczy G., Gyulai J. Continuous carbon nanotube production in underwater AC electric arc. *Chem. Phys. Lett*. 2003. **372**(3–4): 399.
115. Bera D., Brinley E., Kuiry S.C., McCutchen M., Seal S. Optoelectronically automated system for carbon nanotubes synthesis via arc-discharge in solution. *Rev. Sci. Instrum*. 2005. **76**(3): 033903.
116. Shenli J., Xing G., Xu Q., Shi Z. Influence of Magnetic Field on Carbon Nano-materials Produced in Liquid Arc. In: *1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. IEEE*. 2006. 10312046.
117. Zolotareno O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno A.N.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Zolotareno A.D., Zagorulko I.V., Zolotareno O.D., Tarasenko Yu.O. Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures. *Physics of Metals and Advanced Technologies*. 2021. **43**(10): 1417.
118. Zolotareno O.I., Rudakova E., Zolotareno A.N., Schur D., Chymbai M. New composites based on carbon nanostructures and solid polymers for 3D printing technology FDM. In: *IX International Scientific and Practical Conference "trends of development modern science and practice"*. (November 16–19, 2021, Stockholm, Sweden). P. 107.
119. Zolotareno A.I.D., Zolotareno A.N.D., Sementsov Y.I., Schur D.V., Gavrylyuk N.A., Zolotareno A.D., Tarasenko Yu.A., Rudakova E.P. Influence of carbon nanostructures on the mechanical characteristics of a composite based on solid polymers for 3D printing technology (FDM). In: *7th International Materials Science Conference HighMatTech-2021*. (October 5–7, 2021 Kyiv, Ukraine). P. 13.

Надійшла 20.02.2022, прийнята 01.06.2022