

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН
України, доктору фізико-математичних наук,
старшому науковому співробітнику відділу
гетероструктурованих матеріалів Інституту
сцинтиляційних матеріалів НАН України
Тарасенко Олегу Анатолійовичу

ВІДГУК

**Офіційного опонента, кандидата технічних наук, професора
кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів НТУ
«Харківський політехнічний інститут» Авраменко Вячеслава
Леонідовича**

на дисертаційну роботу **Сібілевої Тетяни Григорівни**

**«Виготовлення сцинтиляторів на основі полістиролу методом
3D-друку»**

подану до захисту у разову спеціалізовану вчену раду Інституту
сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України на здобуття
ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство галузі
знань 13 Механічна інженерія

Актуальність обраної теми дисертації.

Дисертаційна робота Сібілевої Тетяни Григорівни присвячена розробці
нових технологічних підходів щодо виготовлення сцинтиляційних елементів
на основі полістиролу методом 3D-друку, зокрема багатоелементних
сцинтиляторів зі складними геометричними конфігураціями. Пластмасові
сцинтилятори на основі полістиролу відомі вже давно, при цьому, завдяки
своїм унікальним властивостям, вони знаходять широке застосування для

виготовлення різноманітних детекторів іонізуючих випромінювань. Сьогодні експерименти з фізики високих енергій вимагають від детекторів високої просторової роздільної здатності, що може бути реалізовано за рахунок сегментації сцинтиляційного матеріалу. Наразі проекти модернізації детекторів нейтрино потребують декількох мільйонів кубиків розміром $10\text{ мм} \times 10\text{ мм} \times 10\text{ мм}$ із сцинтиляційного матеріалу на вініл-ароматичній полімерній основі (полістирол або полівінілтолуол) з відбивачем на поверхні, а також з ортогональними отворами під спектросміщуюче волокно. Але стандартні технології виробництва дуже трудомісткі через багатостадійність виготовлення та складність збирання окремих кубиків в єдиний детектор. Крім того, на певному етапі збирання складові частини детектору (кубики) під власною вагою починають зміщуватися зі свого проектного положення, а тому потребують додаткових опірних конструкцій.

В роботі автором запропоновано використання 3D-друку для виробництва сцинтиляційних детекторів зі складною геометрією, що дозволяє спростити процес виготовлення, уникаючи багатостадійності виробництва, постобробки, а також додаткових опірних конструкцій при зборці детектору.

З огляду на це, дисертаційна робота Сібілевої Тетяни Григорівни, яка спрямована на розробку сцинтиляційних і світловідбиваючих матеріалів для 3D-друку та розробку технологічних підходів щодо виготовлення багатoelementних детекторів на основі полістиролу, зокрема методами 3D-друку, є актуальним завданням.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів

Загальний обсяг кваліфікаційної наукової праці, що подана на рецензію, складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел літератури. Загальний обсяг роботи складає 207 сторінок, з них 168 сторінок основного тексту (вступ, розділи дисертації та

висновки). Список використаних джерел літератури містить 138 найменувань. Дисертація містить 25 таблиць, 110 рисунків і 2 додатки.

У першому розділі дисертаційної роботи наведено огляд літературних джерел, на основі яких розглянуто способи виготовлення сцинтиляторів на основні полістиролу, типи світловідбиваючих матеріалів для сцинтиляторів, а також сучасний стан розвитку технологій 3D-друку в галузі сцинтиляторів.

У другому розділі дисертаційної роботи описано методи виготовлення сцинтиляторів на основі полістиролу, виготовлення філаментів для 3D-друку та процес 3D-друку, які використовувались в роботі. Також у розділі описані методи дослідження сцинтиляційних та оптичних властивостей отриманих зразків.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений розробці сцинтиляційного філаменту для 3D-друку. Також досліджуються оптичні та сцинтиляційні властивості отриманих зразків в залежності від складу і режимів 3D-друку.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці світловідбиваючих філаментів для 3D-друку на основі різних полімерних сполучних середовищ та різних пігментів. Також досліджуються оптичні властивості отриманих зразків в залежності від складу.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці технологічних підходів щодо одночасного 3D-друку сцинтиляційним та світловідбиваючими філаментами, зокрема для виготовлення дрібносегментованих пластмасових сцинтиляторів. Також наведено результати випробовувань отриманих сцинтиляторів.

Висновки дисертаційної роботи автор сформулював, базуючись на поставлених завданнях. Наведені висновки повністю відповідають поставленій меті дослідження та змісту представлених результатів.

Значимість дослідження для науки і практики

Автором вперше:

- Визначено оптимальний склад сцинтиляційного філаменту для 3D друку, що включає паратерфеніл, 1,4-біс(5-феніл-2-оксазоліл)бензол, дифеніл, діоктилфталат та оптично прозорий полістирол. Продемонстровано, що дифеніл та діоктилфталат, які використовуються у зазначених кількостях в якості пластифікаторів, зменшують мінімальний радіус вигину отриманого філаменту до 65 мм, що забезпечує стабільність процесу 3D-друку пластмасових сцинтиляторів за технологією моделювання методом пошарового наплавлення (FDM) без розтріскування матеріалу із відносним світловим виходом на рівні зразків, отриманих за традиційними технологіями (полімеризація у масі, екструзія та лиття під тиском).
- Досліджено вплив параметрів 3D-друку пластмасових сцинтиляторів на основі полістиролу на оптичні та сцинтиляційні характеристики отриманих зразків. Визначено оптимальний режим 3D-друку, що дозволяє отримувати прозорі зразки з технічною довжиною ослаблення до 20 см і сцинтиляційними характеристиками, порівняними зі зразками, виготовленими за традиційними технологіями.
- Визначено склади світловідбиваючих філаментів на основі полікарбонату та поліметилметакрилату з додаванням від 5 мас. % до 10 мас. % діоксиду титану, від 5 мас. % до 15 мас. % дрібнодисперсного порошку політетрафторетилену та від 1 мас. % до 2 мас. % диоктилфталату, які дозволяють методом 3D друку формувати світловідбиваючі шари з коефіцієнтами відбиття до 92% та коефіцієнтами пропускання до 0,2% на довжині максимуму люмінесценції пластмасового сцинтилятора (420 нм) при товщині відбиваючого шару 1 мм.

- Продemonстровано можливість одночасного 3D-друку сцинтиляційним та світловідбиваючим філаментами, що дозволяє в єдиному виробничому циклі без необхідності постобробки виготовляти багатoelementні пластмасові сцинтилятори на основі полістиролу із відносним світловим виходом при опроміненні космічними мюонами на рівні еталону (з аналогічною геометричною конфігурацією), виготовленого із склеєних кубиків пластмасового сцинтилятора, отриманих методом полімеризації у масі, при цьому світлові перехресні перешкоди між сцинтиляційними елементами не перевищують 2%.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено сцинтиляційний та світловідбиваючі філаменти, які дозволяють виготовляти пластмасові сцинтилятори з відбивачем методом 3D друку в єдиному виробничому циклі без постобробки, зокрема багатoelementні дрібноsegmentовані сцинтилятори із відносним світловим виходом на рівні еталону з такою ж геометричною конфігурацією, який було виготовлено із склеєних сцинтиляційних кубиків, отриманих методом полімеризації у масі.

Розроблені світловідбиваючі філаменти можуть використовуватись як при одночасному 3D-друці із пластмасовим сцинтилятором, так і окремо для виготовлення відбивачів для будь-яких інших сцинтиляторів, при цьому коефіцієнт відбиття сягає 92%.

Розроблено технологічні підходи щодо 3D-друку пластмасових сцинтиляторів на основі полістиролу, які можуть бути застосовані на будь-яких 3D-принтерах, що працюють за технологією FDM. При цьому технічна довжина ослаблення надрукованого ПС сягає 20 см, а світловий вихід порівняний з ПС, виготовленими за традиційними технологіями

(полімеризація у масі, екструзія, лиття під тиском), при розмірі сцинтиляційних елементів 10 мм × 10 мм × 10 мм.

За результатами розробок отримано патент на корисну модель України №151781, G01T 1/20 (2006.01) «Сцинтиляційна матриця для реєстрації іонізуючого випромінювання». Методом 3D-друку виготовлено сцинтиляційні матриці та прототип дрібносегментованого сцинтилятора «Суперкуб», які забезпечують мінімальні оптичні перехресні перешкоди та сцинтиляційну ефективність на рівні еталонного зразку, отриманого із склеєних кубиків, виготовлених методом полімеризації у масі.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації

1. Автором роботи досліджено широке коло пластифікаторів різної хімічної природи і термодинамічної спорідненості до полістиролу. Тому можлива проява різних механізмів пластифікації (внутрішньоструктурного та міжструктурного). Це питання не відображено в роботі.

2. Автор використовує для багатьох матеріалів, що фігурують в дослідженнях, термін «філамент», який розповсюджений серед дослідників 3D-друку. Але термін «філамент» має дуже широке використання і в інших галузях – біології, астрономії, виробництві філаментних ламп та ін. Тому вважаємо що в екструзійному процесі, який використовується при 3D-друці доцільніше використовувати замість терміну «філамент» загальноприйнятий термін – «стренга».

3. Зустрічаються термінологічні і мовні огріхи: «сополімер», «сополімеризація» замість номенклатурних «кополімер», «кополімеризація»; «на протязі» замість «протягом».

Однак вказані зауваження не впливають на високий науковий рівень та практичну цінність дисертаційної роботи. Дисертаційна робота актуальна, завдання та мета роботи чітко сформульовані та досягнуті. Одержані результати роботи заслуговують загальну позитивну оцінку.

Відсутність порушень академічної доброчесності

У дисертації та наукових публікаціях Сібілевої Тетяни Григорівни відсутні порушення академічної доброчесності.

Загальний висновок та оцінка дисертації.

Вважаю, що за актуальністю, новизною, рівнем і достовірністю отриманих наукових результатів дисертація Сібілевої Тетяни Григорівни «Виготовлення сцинтиляторів на основі полістиролу методом 3D-друку» повністю відповідає всім вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Сібілева Тетяна Григорівна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство в галузі знань 13 Механічна інженерія

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук,
професора кафедри технології пластичних мас
і біологічно активних полімерів
НТУ «Харківський політехнічний
інститут»

Вячеслав АВРАМЕНКО