

## **МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ ПІД ЧАС НАВЧАННЯ ФІЗИКИ У ЗАГАЛЬНООСВІТНІЙ ТА ВИЩІЙ ШКОЛІ**

*У статті окреслено шляхи застосування технологій 3D-друку під час навчання фізики у загальноосвітній та вищій школі. Акцентовано увагу на можливостях реалізації міжпредметних зв'язків при вивченні фізики, інформатики та технологічних дисциплін.*

**Ключові слова:** 3D-друк, швидке прототипування, полімерні матеріали, навчальний фізичний експеримент.

**Постановка проблеми.** Сьогодні інформаційні технології стали невід'ємною частиною сучасного освітнього середовища, а якісне та сучасне викладання навчальних дисциплін природничого циклу вважається неможливим без ефективного використання їхніх дидактичних та методичних можливостей. Цілком закономірно, що широке впровадження інформаційно-комп'ютерних технологій у навчальний процес декларовано «Національною стратегією розвитку освіти в Україні на 2012–2021 роки» [1].

Разом із цим, спостерігається тенденція впровадження у навчальний експеримент з фізики засобів сучасної електроніки та останніх технологічних розробок, перше ознайомлення з якими в учнів та студентів відбувається, зазвичай, поза межами освітніх закладів. Серед таких новинок, доцільність впровадження та можливості застосування яких у освітньому процесі зараз активно обговорюються, є технологія 3D-друку.

3D-друк (3D-принтинг) – це сучасна технологія створення твердих об'єктів, в основу якої покладено принцип шарового вирощування 3D-моделі. У 3D-принтері, як правило, термопластичні полімерні матеріали перетворюються у виріб з розтопу. 3D-принтер дозволяє у домашніх умовах створювати речі, виготовлення яких раніше було можливим тільки засобами промислового виробництва. Ці пристрої вже зараз успішно використовуються для швидкого прототипування в інженерії, протезування в медицині, малосерійного виробництва в арт- та дизайн-індустрії тощо. 3D-технологія, маючи практично необмежений потенціал, відкриває нові обрії для розв'язання наукових та освітніх задач.

Недорогі 3D-принтери, впроваджені в освітнє середовище, створюють можливості для нестандартного навчання. Моделі, розроблені на комп'ютерах, можна надрукувати і отримати макет в трьох вимірах (3D). Теорія швидко реалізується у вигляді фізичних об'єктів, які можна взяти у руки. Учні мають можливість працювати з сучасними і трендовими інструментами. Самостійне навчання можливе протягом усього процесу 3D-друку, починаючи від ідеї і закінчуючи надрукованим об'єктом. 3D-принтер – безпечний пристрій, він не несе загрози учням при використанні. Ітеративний процес зручний для занять, тому що ескізи можуть бути змінені та передруковані в будь-який час. Отже, продукт може бути розроблений поступово, крок за кроком. Крім того, це альтернатива стандартному навчанню «Читанням і письмом», адже ця робота скоріше – «Навчайся в дії».

**Аналіз останніх досліджень.** Одним із перших експериментів з використанням 3D-принтерів у навчальному процесі вважається проект «Гюгельтаун: учні роздруковують своє власне місто» [2]. Проект реалізовувався з серпня 2012 по січень 2013 протягом 16 уроків (кожен по 90 хвилин) з технічного креслення в 8-х та 9-х класах у м. Штеффісбург (Швейцарія) з учнями 14-15 років під керівництвом педагогів Курта Майстера (школа Штеффісбурга) і Грегора Лютолфома (Педагогічний Університет Берна, PНВern). Учні були ознайомлені і поступово залучені до роботи з 3D-принтером, виконуючи моделювання та 3D-друк. Натхненні проектом, вони робили креслення будівель для свого невеликого містечка Гюгельтаун. Ділянки землі (лоти) на карті міста мали різні розміри і формувалися окремо. Презентація Гюгельтауна батькам та іншим зацікавленим особам була організована на останньому уроці. Учні представили робочий процес 3D-друку безпосередньо в класі. Результати проекту Гюгельтаун опубліковані в декількох інформаційних статтях. Автори статей відзначають високу мотивацію учнів протягом всього проекту. Учні практично не пропускали уроки, навіть маючи інші важливі справи. На підставі педагогічних спостережень та відгуків учнів робиться висновок, що значна частка мотивації з'явилася завдяки наявності 3D-принтера, який дав можливість перетворити ідеї та моделі в реальні об'єкти. Мотивацію підтримувала і простота використання вільних програмних інструментів. Загальні витрати проекту склали 3500 €. Більшість витрат були оплачені Педагогічним Університетом Берна, в тому числі години роботи свого викладача. Школа Штеффісбурга оплатила близько 150 € для друку карти міста і фінансувала підсумкову презентацію.

У 2014 р. містами Росії пройшла акція для учнів 8-11 класів загальноосвітніх шкіл із збирання 3D-принтерів під назвою «Мейкертон 3D-принтер для школярів» [3]. Ці очні майстер-класи відбувалися за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки РФ і проходили у формі марафонів тривалістю до 6 годин, протягом яких учасники навчалися збирати 3D-принтер своїми руками з готового набору під керівництвом наставників, вчилися налаштовувати та працювати на 3D-принтерах.

За підсумками майстер-класу учні отримували повністю готові до роботи 3D-пристрої і забирали їх в свої навчальні заклади. Все навчання відбувалося під керівництвом досвідчених фахівців у даній тематиці, яких надавав організатор майстер-класу. Процес складання 3D-принтера не вимагав складних фізичних процедур і навичок. Все зводилося до послідовного з'єднання деталей згідно із інструкцією. Один принтер збирала команда з 3 учнів, кожну команду супроводжував викладач зі школи.

Мета цього конкурсу – поширення досвіду роботи з робототехнікою, 3D-моделюванням і 3D-друком, розширення і зміцнення технічної бази загальноосвітніх закладів та закладів позашкільної освіти дітей.

Один з таких мейкертонів із збирання 3D-принтера власними силами відбувся 5 вересня 2014 р. у м.Києві в рамках виставки-конференції передових технологій «3D Print Conference Kiev» [4].

Таким чином, популяризація технологій 3D-друку за допомогою освітніх програм, майстер-класів, виставок компаній-виробників та дистриб'юторів є важливим завданням інформаційно-комунікаційних технологій в освіті. При цьому відкриваються перспективи створення у кожній школі високотехнологічних майстерень Fab Lab, де можна буде знайти

обладнання, таке як 3D-принтери, ЧПУ-станки для лазерної різки і все те, що потрібно для роботи з актуальними технологіями електроніки та робототехніки. Перша така Fab Lab була ініційована в 2002 р. Нілом Гершенфелдом у Массачусетському Технологічному Інституті. На даний час продовжується поширення ідеї Fab Lab у світі, забезпечуючи доступ до сучасних виробничих процесів усім зацікавленим учням [5].

Відповідно, **метою статті** є ознайомлення читачів з існуючими на сьогоднішній день технологіями швидкого прототипування тривимірних об'єктів, проведення огляду новітніх досягнень у технології 3D-друку, що тільки зароджується в Україні, та поширення досвіду використання 3D-принтерів у сучасному освітньому середовищі.

**Виклад основного матеріалу.** Нову технологію конструювання фізичних 3D-об'єктів з ряду суміжних 2D-зображень за допомогою нанесення шарів або зрізів обмеженої товщини називають адитивним виробництвом (AM, Additive Manufacturing) [6].

На відміну від субтрактивних методів, які будують закінчений 3D-об'єкт, зрізуючи матеріал з початкового блоку, машини AM обробляють поперечні зрізи так, щоб вони, накладаючись шар за шаром, набули форму фізичного об'єкта. Більш тонкі шари будуть краще наближати модель до оригіналу. Машини AM, що використовують пошаровий підхід, можуть відрізнитися за типом матеріалу і мати відмінності у способах формування шарів.

Найбільш поширеною технологією адитивного виробництва для персонального 3D-друку є Fused Deposition Modeling (FDM, метод пошарового наплавлення). Останнім часом часто стала вживатися інша назва цієї ж технології – Fused Filament Fabrication (FFF). При методі пошарового наплавлення друкуюча головка 3D-принтера видавлює розплавлений матеріал. При цьому вона вільно переміщається по горизонталі і, нарощуючи шари, поступово піднімається вгору.

Ця технологія була створена наприкінці 80-х років С. Скоттом Крампом (S. Scott Cramp), який запатентував її у 1989 р. і заснував компанію Stratasys. Перші комерційні апарати, що працювали за цією технологією, були випущені в 90-х роках ХХ століття, і тривалий час Stratasys залишалась єдиним постачальником таких тривимірних принтерів, пропонуючи свої машини за ціною не нижче 25000 \$, що дуже обмежувало їх застосування. Однак відносно недавно термін дії патенту закінчився, наслідком чого став вихід на ринок усіляких недорогих моделей FDM-принтерів від різних виробників [7].

**Підготовка до 3D-друку, будова 3D-принтера та друк об'єктів.** Як вже зазначалося, 3D-принтери створюють реальні речі з віртуальних моделей. Тому, в першу чергу, в програмі для 3D-моделювання створюється цифрова версія майбутнього об'єкта. Ця модель обробляється спеціальною програмою («слайсер» або «генератор G-коду»). Початковий об'єкт «розрізається» на тонкі горизонтальні шари і перетворюється в цифровий код, який зрозумілий 3D-принтеру. Іншими словами, «слайсер» створює набір команд, які вказують 3D-принтеру, як і куди потрібно наносити матеріал при 3D-друці даного об'єкта. Після того, як модель оброблена і G-код згенеровано, об'єкт відправляється на друк.

Існує багато типів 3D-принтерів, що відрізняються за будовою та специфікою роботи. Однак, всі ці прилади використовують один і той самий базовий принцип 3D-друку – побудова об'єкта з тонких горизонтальних шарів матеріалу. На рис.1 показано схематичну будову 3D-принтера. Це дуже спрощена модель, вона служить тільки для наочної

демонстрації базових принципів роботи. Друкуюча головка формує шари матеріалу, поступово вирощуючи з них об'єкт. Вона рухається тільки в горизонтальній площині (уздовж осей X і Y). Робоча платформа потрібна для розміщення об'єкта під час друку, вона рухається зверху вниз (по осі Z).

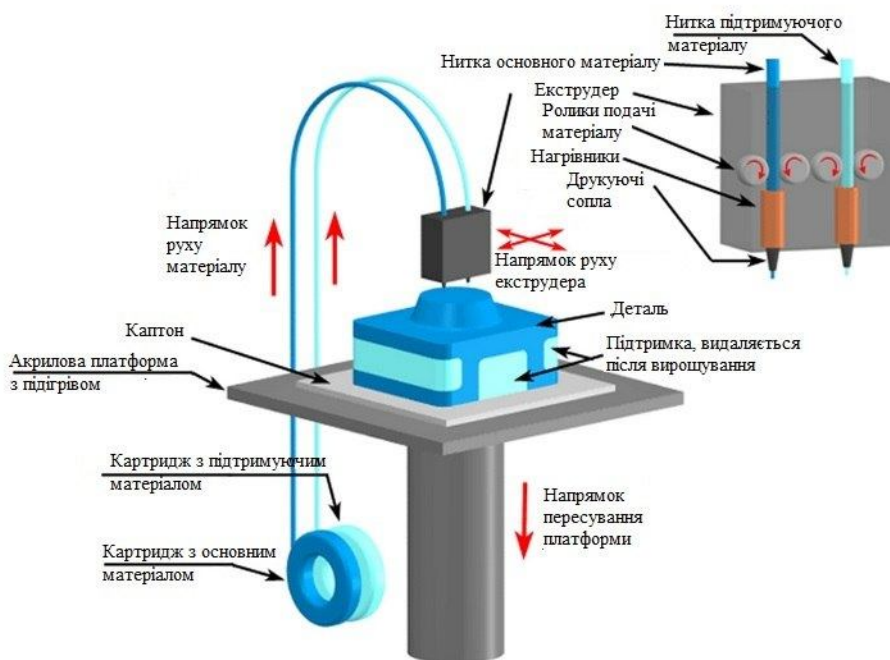


Рис. 1. Схематичне зображення роботи 3D-принтера

На початку процесу 3D-друку робоча платформа знаходиться у верхньому положенні, а друкуюча головка накладає на неї нижній шар об'єкта. Після того, як перший шар сформовано, робоча платформа опускається на товщину шару і друкуюча головка накладає новий шар матеріалу на попередній (рис. 2).

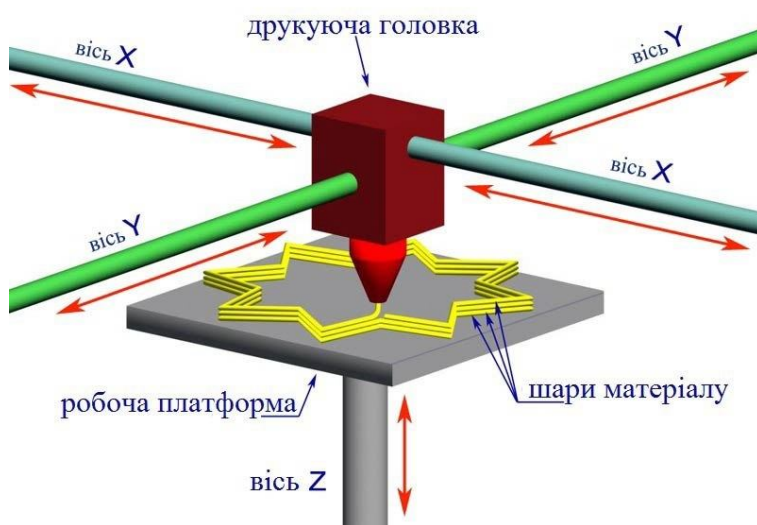


Рис. 2. Схематичне зображення друку головкою 3D-принтера

Цей цикл повторюється доти, доки не буде побудований цілий об'єкт. У кожній моделі і, тим більше у різних типів 3D-принтерів, є свої особливості функціонування, але базовий принцип роботи – один.

На даний час (кінець 2014 р.) для недорогого 3D-друку використовуються в основному два полімерних матеріали (ABS і PLA) та кілька менш поширених видів. При цьому розробляються і тестуються багато видів пластику, що мають широкий діапазон фізичних, хімічних і механічних характеристик, тим самим відкриваючи шлях до використання 3D-друку в різних напрямках.

**Науково-дослідна робота у вищій школі з вивчення властивостей полімерних матеріалів для 3D-друку.** Як показує практика, деякі користувачі 3D-принтерів нарікають на труднощі в роботі з ними, а дехто взагалі жалкує, що придбав цей пристрій для домашнього використання. Недоліками багатьох моделей сучасних 3D-принтерів є складний та тривалий процес налаштування та калібрування, недосконале і незручне програмне забезпечення, неточний 3D-друк деталей або відтворення їх з деформаціями та дефектами, погана організація подачі пластику, його деструкція та застрягання в соплах принтерів. Звичайно, це стосується не всіх моделей 3D-принтерів, але такі проблеми є у більшості, в першу чергу – у персональних бюджетних пристроїв.

Для успішного вирішення зазначених проблем в лабораторіях фізики полімерів при кафедрі фізики Рівненського державного гуманітарного університету організована науково-дослідна робота з вивчення комплексу властивостей полімерних матеріалів, що використовуються, зокрема, в бюджетному персональному 3D-принтингу. Студенти РДГУ в процесі виконання своїх кваліфікаційних робіт встановлюють фактори, що визначають оптимальні режими 3D-друку полімерними матеріалами з нелінійними в'язкопружними властивостями. Всебічне вивчення властивостей таких полімерних матеріалів сприяє вдосконаленню технології 3D-друку.

Об'єктами дослідження, як правило, є промислові полімерні матеріали, одержані на основі PLA, ABS-пластику та нейлону. Для експериментального дослідження в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів застосовують 3D-принтер «MakerBot Replicator» з екструдером MakerBot Stepstruder MK7, метод вимушених резонансних коливань консольно-закріпленого стержня на звукових частотах. Структурування систем досліджують методами коливальної спектроскопії за допомогою ІЧ-спектрів поглинання стосовно базової лінії за змінами оптичної густини смуг.

В результаті проведеної роботи за останній рік були вивчені основні параметри в'язкопружних властивостей промислових полімерних матеріалів, що використовуються в бюджетному персональному 3D-принтингу. При цьому встановлено, що у технології 3D-друку є певні особливості, які пов'язані з нелінійними в'язкопружними властивостями полімерних матеріалів. У головці-екструдері принтера полімер при 3D-друці утворює неоднорідну область з нестійкою термодинамічною рівновагою, де в'язкість полімерного матеріалу можна нелінійно змінювати в широкому діапазоні температур.

У багатьох випадках в'язкопружні характеристики ABS пластиків різних виробників мають певні відмінності, які пов'язані з їх структурними особливостями (розмірами макромолекул та їх структурою), а також з показниками якості полімерних матеріалів. При цьому вони мають різні термодинамічні показники в'язкопружних характеристик.

Вимірювання динамічного модуля  $E'$  зразків промислового ABS від різних виробників показали суттєві відмінності в результатах. Виявлено розбіжності значень  $E'$  до

20% в залежності від марки ABS-пластиків в межах одного виробника. У них методом ІЧ-спектроскопії виявлені структурні особливості за характерною смугою поглинання групи  $-C\equiv N$ , яка належить поліакрилонітрилу. Відмінності у зменшенні в'язкості ABS пластиків різних видів при зростаючій механічній дії призводять до того, що при протіканні розтопу через фільтр'єру головки 3D-принтера витрата полімеру зростає нелінійно відповідно до якості полімерного матеріалу.

Крім того, термічна технологія 3D-друку накладає певні обмеження на використання готових виробів. Практично всі досліджувані полімерні матеріали характеризуються значними коефіцієнтами теплового розширення, а тому в процесі 3D-друку необхідно враховувати деформацію всієї деталі після її повного охолодження. Під час 3D-друку в полімерному матеріалі виникають внутрішні напруження і це призводить до того, що отримані моделі/деталі набувають комплексу анізотропних фізико-механічних властивостей, а іноді мають деформацію (усадку) робочого матеріалу, внутрішні тріщини. У деяких дорогих моделях 3D-принтерів для часткового запобігання цим шкідливим явищам передбачається підігрів робочої платформи, на якій формується виріб.

Отримані результати дозволяють визначати величини оптимального градієнта температур для якісного 3D-друку нетрадиційними матеріалами, зокрема, нейлоною ниткою. Такі розробки необхідні для отримання ефективного та дієвого методу 3D-друку з використанням широкого кола полімерних матеріалів.

**Застосування 3D-друку в загальноосвітній школі.** Сучасний період розвитку суспільства характеризується сильним впливом на нього комп'ютерних технологій, які проникають в усі сфери людської діяльності, забезпечують розповсюдження інформаційних потоків у суспільстві, утворюючи глобальний інформаційний простір. Не може залишатися осторонь цих новітніх процесів освіта, поступово формуючи дидактичну концепцію застосування 3D-друку під час вивчення різних шкільних предметів. Наприклад:

- у математиці – це розробка, друк та розрахунок 3D-об'єктів;
- у біології – демонстрація роздрукованих на 3D-принтері моделей РНК і ДНК, різних молекул і вірусних частинок, 3D-друк скелетів хребетних тварин;
- у географії – побудова, друк та вивчення різноманітних рельєфів тощо.

На уроках фізики та технічної праці вивчаються принципи роботи 3D-принтера, його основні компоненти та їх функції (екструдер, платформа, механізм подачі пластика), проводяться практичні роботи із збирання принтера та фіксації спостережень та вимірювань, що відносяться до 3D-друку. Підключаються зовнішні пристрої, з'єднуються блоки 3D-принтера, вивчаються сигнали про готовність та неполадки, отримують інформацію про характеристики 3D-принтера. Учасник навчального процесу збирає 3D-принтер сам і при цьому детально вивчає його будову. Це абсолютно новий рівень залучення учнів до інженерії, конструювання та винахідництва. Школяр не ставиться до принтера, як до "чорного ящика". Він добре розуміє процес друку. Зібравши принтер, він може керувати ним і не боїться щось зламати.

3D-принтер дозволяє роздрукувати практично повний комплект для виконання експериментального практикуму з фізики. Так, надрукувавши самостійно різні пружини та кульки, можна, наприклад, проводити дослідження залежності періоду коливань пружинного

маятника від маси тягарця та жорсткості пружини, встановлювати залежності періоду та частоти вільних коливань математичного маятника від довжини нитки і т.п.

На уроках інформатики або технологій вивчається програмний принцип роботи 3D-принтера, програмне забезпечення, його структура, формат файлів для роботи на 3D-принтері, командну взаємодію користувача з 3D-принтером, графічний інтерфейс (робочий стіл, вікна, діалогові панелі, меню). Відбувається планування інформаційного простору, збереження інформаційних об'єктів на зовнішніх носіях. Даються основи 3D-моделювання.

Опанування 3D-друком відбувається одночасно при вивченні окремих тем різних предметів. Передбачається проведення короткотривалих фронтальних лабораторних робіт та робіт фізичного практикуму, спрямованих на відпрацювання окремих технологічних прийомів роботи з 3D-технологіями, і інтегрованих практичних робіт, орієнтованих на отримання цілісного змістовного результату, осмисленого і цікавого для учнів. Частина практичної роботи (насамперед підготовчий етап, який не потребує використання 3D-принтерів) може бути включена в домашню роботу учнів, в проектну діяльність. Роботу краще поділити на частини і здійснюватися протягом кількох тижнів.

Вивчення 3D-принтерів і технологій прототипування в загальноосвітній та вищій школі, на нашу думку, сприятиме:

- засвоєнню учнями системи наукових знань про технології сучасного 3-D конструювання та моделювання;
- оволодінню вміннями працювати з 3D-принтерами за допомогою комп'ютера та інших засобів інформаційних технологій;
- розвитку експериментаторської культури при організації власної проектно-діяльності та плануванні результатів;
- активізації пізнавальної діяльності суб'єктів навчання, розвитку їхніх інтелектуальних та творчих здібностей, освоєнню професій, що ціняться на ринку праці.

**Висновки.** В останні декілька років активно розвиваються технології створення реальних фізичних об'єктів за допомогою 3D-друку. Очевидно, що такі розробки є перспективними і будуть широко застосовуватися у майбутньому. Тому сьогодні актуальним є пошук шляхів та можливостей ознайомлення із ними учнів та студентів в межах навчального процесу у загальноосвітній та вищій школі.

У статті наведено приклади популяризації технологій 3D, електроніки та робототехніки у освітньому середовищі через активізацію пізнавальної діяльності суб'єктів навчання. Проте саме питання дидактичних та методичних можливостей використання 3D-принтерів у навчальному процесі потребує більш детального подальшого дослідження.

### Список використаної літератури

1. Національна стратегія розвитку освіти в Україні на 2012–2021 роки: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mon.gov.ua/images/files/news/12/05/4455.pdf>
2. Using 3D Printers at School: the Experience of 3drucken.ch. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.3drucken.ch/p/gueggeltown.html>

3. Мейкертон «Собери свой гаджет за 1 день!». Марафон по сборке 3D-принтеров и мультикоптеров своими руками: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://makerton.org/>
4. 3D Print Conference Kiev. Выставка-конференция передовых технологий 3D-печати и сканирования: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dprintconf.com.ua/>
5. Fab Lab FAQ: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fab.cba.mit.edu/about/faq/>
6. The Latest News in AM Education, Classes and More: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://additivemanufacturing.com/category/education/>
7. Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sdu.ictp.it/3D/book.html>

***Кривцов В.В. Возможности использования 3D-печати во время обучения физики в общеобразовательной и высшей школе.***

*В последние годы активно развиваются технологии создания реальных физических объектов с помощью 3D-печати. Очевидно, что такие разработки являются перспективными и будут широко применяться в будущем. Поэтому сегодня актуальным является поиск путей и возможностей ознакомления с ними учащейся молодежи в рамках образовательного процесса. В статье представлены примеры популяризации технологий 3D, электроники и робототехники в образовательной среде через активизацию познавательной деятельности субъектов обучения, определены возможности применения 3D-печати при обучении физики в общеобразовательной и высшей школе. Акцентировано внимание на реализации межпредметных связей во время изучения физики, информатики и технологических дисциплин. Сделана попытка исследования огромного потенциала, который обеспечивает эта доступная технология, направленная на повышение качества обучения учащихся через практический опыт и интерактивную деятельность. При этом автор делится собственным опытом использования 3D-печати в современной образовательной среде.*

***Ключевые слова.*** 3D-печать, быстрое прототипирование, полимерные материалы, учебный физический эксперимент.

***Krivtsov V. Possibilities of 3D printing usage for teaching physics in secondary and higher school.***

*The paper shows ways of 3D printing technology implementation for teaching physics in secondary and higher school. attention is made on the feasibility of intersubject communications in teaching physics, information technology and handicraft.*

***Keywords.*** 3D printing, rapid prototyping, polymer materials, teaching experiment in physics.