

ДОДАТОК А
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

**IX Міжнародна Конференція
ВИРОБНИЦТВО
&
МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2025**



**IX International Conference
MANUFACTURING
&
MECHATRONIC SYSTEMS 2025**

M&MS

2025

IX International Conference
25-26 October
Kharkiv

M&MS 2025, 24-25 October, Kharkiv, UKRAINE

Review and Selection of Optimal Sensors for Building a Production Facility Microclimate Monitoring System	50
<i>Tymofii Cherednichenko, Svetlana Sotnik</i>	
Features of Automatic Working Time Control Systems	54
<i>Максим Лисун, Дмитро Нікімін</i>	
Конструкція та технологія LCD друку та основні параметри слайсерів для фотополімерного друку	58
<i>Микола Церцек, Дмитро Нікімін</i>	
Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку	62
<i>Anton Andreiev, Svetlana Sotnik</i>	
“Web application security: protection against modern cyber threats” Overview of key vulnerabilities (XSS, CSRF, SQL injections), protection methods, use of HTTPS, authentication, and authorization	66
<i>Ivan Dolhosheia, Oleksandr Tsybal</i>	
Methods of Automated Monitoring and Control System of Greenhouse Complex	71
<i>Svitlana Maksymova, Pavlo Shakhov</i>	
Development of a Model for Decentralized Control of a Group of Collaborative Robot Manipulators	76
<i>Stetsenko Kateryna</i>	
Integration of Artificial Intelligence in Assistive Robots: Challenges and Opportunities	80
<i>Вадим Онищенко, Олександр Малій, Вадим Мірошніченко</i>	
Використання методів комп’ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації підготовки САД-документації друкованих плат	83
<i>Дмитро Янушкевич, Леонід Іванов, Ігор Толкунов</i>	
Застосування інтелектуальних систем управління робототехнічними системами для досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування	88
<i>Vitalii Ovcharenko, Olena Tokarieva</i>	
	92

Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку

Микола Церцек¹, Дмитро Нікітін¹

¹ Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки, 14., email: mykola.cercec@nure.ua

Анотація: У роботі проведено аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються у філаменті під час його зволоження та наступного плавлення в екструдері.

Ключові слова: 3D-друк, FFF/FDM технологія, впливу параметрів, сушіння філаменту

I. ВСТУП

У сучасних умовах розвитку адитивних технологій, зростання попиту на персоналізовані вироби та швидке прототипування постає необхідність підвищення якості та надійності 3D-друку. Один з найпопулярніших способів – це FFF (Fused Filament Fabrication) або FDM (Fused Deposition Modeling). Це коли береться нитка пластику і шар за шаром виходить потрібна річ. Просто, недорого, і можна робити багато чого: від деталей на заводі до іграшок вдома. Але тут важливо, з якого пластику друкуєш, бо від цього залежить, чи гарна вийде штука.

Важливо стежити за тим, щоб нитка для 3D-принтера була потрібного діаметру, однаковою по всій довжині, не вологою і міцною. Це дозволяє друкувати стабільно, без браку і з високою точністю. Якщо ми зрозуміємо, як ці параметри впливають на друк, ми зможемо краще передбачити результат, вибрати матеріал і налаштувати 3D-принтер під конкретні завдання.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою у підвищенні якості друкованих виробів, зниженні витрат часу та матеріалів на переробку або повторне виготовлення деталей, а також забезпеченні відтворюваності результатів при серійному виробництві. Створення моделі, яка пов'язує характеристики пластику для друку з якістю самого друку, допоможе технології FFF/FDM стати ще кращою та знайти більше застосувань у сучасному виробництві.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Хоча пластикові вироби на перший погляд здаються стійкими до вологи, філамент для 3D-друку характеризується гігроскопічністю, через що він легко поглинає вологу з навколишнього середовища. Щоб надрукувати щось якісно і щоб принтер не зажував, нитку треба просушити перед роботою. Якщо правильно зберігати і готувати нитку, то все вийде як треба [1].

Здається, щоб вазн зліва та справа зроблені з різних матеріалів: ліва являється мутна, а права – майже прозора. Єдине, що в них однакове – це те, що вони обидві без кольору, рис. 1.

Виявляється, що ці дві вазн зробили з одного й того самого нейлону, з однієї котушки, тільки з перервою в кілька годин. Ліву надрукували, поки матеріал ще не просох, а праву – вже після. Це показує, що нейлон дуже добре вбирає вологу, і це погано впливає на друк [2].



Рис. 1. Приклад пластику до сушіння та після

Котушка кілька тижнів стояла в шафі без упаковки, і за цей час нейлон набрав багато води просто з повітря. Цей матеріал дуже швидко вбирає вологу, і йому вистачає кількох годин, щоб насититися. Інші види пластику теж вбирають воду, але не так сильно. І навіть у зразків одного типу, або партій від одного виробника, ця властивість може бути різною, тому що відрізняється сировина, технологія, барвники та добавки.

Коли в полімерах забагато вологи, це погано, бо відбувається гідроліз – руйнування молекул через реакцію з водою при нагріванні. У 3D-друзі це може призвести до проблем:

- матеріал швидко піниться і з'являються пухирці. Під час друку (наприклад, ABS-пластиком при 240°C) вода закипає і розширюється, утворюючи бульбашки всередині полімеру. Через це поверхня виробу стає нерівною, та й виглядає він не дуже. Якщо чуєте потріскування під час друку – це воно, пухирці, рис. 2.



Рис. 2. Приклад спінювання та утворення пухирців при друкуванні

- розводи та волосся. Коли волога потрапляє всередину, пластик стає рідшим, ніж треба. Через це важко налаштувати принтер, і з'являються нитки та розводи на виробі;

- виражене викривлення. Якщо друкувати вологим пластиком, виріб може втратити форму та викривитися;

- шари погано склеюються. Вода руйнує довгі молекули в пластик, і він стає слабшим. Тому шари можуть розшаруватися під час друку або виріб зламається, коли ви почнете ним користуватися;

- колір змінюється. Через вологу пластик може поміняти відтінок. Коли порівнюєш, як друкує сухий і

мокрій пластик, видно, що сухий підтягється рівніше, рис. 3.



Рис.3. Різниця між вологим пластиком і сухим на виході з сопла екструдера

Багато полімерів вбирають вологу з повітря – їх називають гігроскопічними. У хімії є кілька складних термінів: гігроскопічність – це коли матеріал вбирає вологу, сорбція – сам процес поглинання, а вологість – це коли в матеріалі вже є якась кількість води. Наскільки сильно полімер вбирає воду, залежить від його типу [3].

Наприклад, поліпропілен майже не вбирає – просто трохи зволожується зверху, а от нейлон вбирає добре. Волога вбирається тому, що полімер має особливу будову – ніби клубок із великих молекул. Між цими молекулами і збирається вода з повітря. Якщо вологи забагато, то відбувається ось що:

– полімер починає ніби пінитись. Коли вологий пластик потрапляє в гарячу зону, волога всередині закипає. Пара під тиском робить бульбашки в пластик. Через це на поверхні моделі з'являються дірки та нерівності, і від у неї стає так собі. А ще, ці бульбашки всередині роблять виріб слабшим і він не тримається довго;

– гідроліз полімерів. Це коли вода руйнує великі молекули пластику при високій температурі та тиску. Вдома, коли друкуєш на 3D-принтері (наприклад, нейлоном), температура достатня, щоб почався гідроліз, якщо в матеріалі багато вологи. Гідроліз зменшує кількість ланок у великій молекулі, тобто робить її коротшою, і це впливає на те, наскільки міцним буде виріб.

Коли полімерна нитка потрапляє у вологе середовище, особливо під час нагрівання, вона може руйнуватися. Волога робить свою справу: з'являються нові речовини, ланцюги розриваються, і матеріал слабшає. Через це надрукована річ може розшаруватися або зламатися раніше часу. Якщо у нитці забагато вологи, якість друку падає [4].

Щоб матеріал нормально подавався, доводиться ставити вищу температуру. Але навіть тоді виріб може вийти з браком. Найбільше бояться вологи нитки з нейлону, полікарбонату та сополієфіру. Нитка легко вбирає воду з повітря. Якщо не дотримуватися правил зберігання, тобто тримати її у вологому місці, виникнуть проблеми [5].

Різні полімери по-різному реагують на вологу. Наприклад, нейлон починає вбирати воду вже через 18 годин на повітрі. А PVA, який використовують для друку підтримок і який повністю розчиняється у воді, ще гірше. PLA та ABS теж вбирають вологу, але PLA робить це швидше, ніж ABS. Волога шкодить не тільки нитці, а й принтеру. PLA-нитка, яка набрала від вологи, може так забити сопло, що доведеться його міняти.

III. ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виходячи з плану дослідження є першу необхідно визначити, як сильно філамент насичується вологістю. На цьому етапі дослідження будуть поділені на дві стадії:

- базове сушіння філаменту без попереднього змочування зразка;
- сушіння насиченого філаменту вологою (філамент буде передчасно змоченом, щоб підвититися скільки вологи він зможе поглинути).

В першій стадії експерименту були обрані чотири марки філаменту, які найчастіше використовуються для 3D-друку, а саме: PLA, PETG, ABS та Nylon. Кожен з цих зразків буде братися з нової котушки у базовому пакуванні, вже надане виробником пластику. З кожної котушки буде братися по одному тестовому зразку філаменту діаметром 1,75 мм довжиною 30 мм, рис. 4.

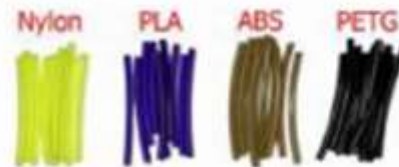


Рис.4. Тестові зразки для дослідження

Оскільки важко визначити вологість зразка з використанням спеціалізованих датчиків вологості твердого тіла, буде використовуватися метод зміни маси зразка до та після сушіння. Дозволяє визначити скільки вологи втрачає зразок під час гідратації філаменту. Для того щоб визначити відсоток втраченої вологи буде використовуватися, наступна формула 3.1:

$$W = \frac{m_{\text{волог}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де, W – вологість зразка, %; $m_{\text{волог}}$ – маса зразка перед сушінням; $m_{\text{сух}}$ – маса зразка після сушіння.

Кожен з цих зразків буде зважений на ювелірних вагах, щоб зафіксувати початкову вагу філаменту. Після чого кожен з зразків буде поміщений до сушильної шафи на час в 1 години до 10 годин, та зважений повторно. Оскільки для кожного виду філаменту, рекомендована своя температура сушіння, для спрощення експерименту та обробки даних буде обрана середнє значення температури сушки, для кожного пластику, табл. 1.

Таблиця 1. Середні значення температури сушіння тестових зразків

Пластик	Температура сушка, °C	Час сушіння, г	Середнє значення температури сушіння, °C
PLA	від 40 до 50	від 4 до 6	45
PETG	від 65 до 70	від 4 до 6	70
ABS	від 70 до 80	від 2 до 4	75
Nylon	від 75 до 85	від 8 до 12	80

Таким чином, були отримані значення 40 тестових зразків з різним ступенем гідратації філаменту. Окрім значень зміни маси та вологості зразка, зафіксовані зміни механічних властивостей.

За результатами дослідження можливо спостерігати що ABS пластик має найбільш різкий ступінь зміни вологи філаменту серед усіх інших матеріалів. Також слід зазначити що при температурі сушіння 75°C на 5 годин сушки стає крихким, а на 9 годин утворюються сколи на поверхні зразка. Це в свою чергу призводить до того що філамент може ламатися при прошиванні матеріалу через механізм подчі.

PLA та PETG, мають більш плавний ступінь втрати вологи зразків та менш впливові до зміни механічних властивостей матеріалів. Це доводить що ці пластики менш схильні впитувати вологу ніж ABS пластик, та більш стійкі до термічних змінх середовищах при температурах 45°C та 70°C.

Nylon пластик, має самий плавний процес випаровування вологи з філаменту, показує що цей матеріал більш схильний до накопичування вологи.

Також незважаючи на най більшу температуру сушки філаменту 80°C, цей філамент не втрачає свої механічні властивості. Графічна демонстрація спостережень першої стадії досліджень наведені на рис. 5.

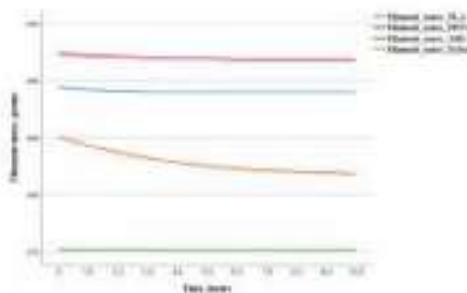


Рис.5. Загальний графік зміни маси зразків філаменту

Другий етап досліджень полягає у визначенні критичної маси вологи, яку філамент може поглинути. Це дозволить визначити максимальний відсоток вологи для кожного пластику, що в свою чергу дозволить на наступних етапах дослідження виключити ці критичні значення до регресійно-кореляційної моделі.

Для цієї стадії дослідження будуть взяті по три зразки кожного філаменту але інших розміру (діаметром 1,75 мм та довжиною 2 м), щоб після сушки пластику можливо було надрукувати тестову модель та повнитися які дефекти друку можуть з'явитися. Три зразка для кожного типу пластику, дозволять уникнути раптових викидів у замірах та усереднити кінцеве значення для кожного філаменту. Була зважена їх початкова маса, після чого кожен зразок був розміщений у воду кімнатної температури 23°C на одну добу, та знову зважений. Це дозволить визначити, як сильно кожний тип філаменту може накопичувати вологу та наскільки сильно може змінюватися його маса. Наступним кроком було проведена сушка пластику на максимальній рекомендованій час та температури сушки, для кожного типу пластику табл. 2:

- ABS пластик: час сушки 4 години, температура сушки 75°C;
- PLA пластик: час сушки 6 години, температура сушки 45°C;
- PETG пластик: час сушки 6 години, температура сушки 70°C;
- Nylon пластик: час сушки 12 години, температура сушки 80°C.

Це дозволить порівняти наскільки сильно будуть відрізнятися маси філаменту перед початком експерименту та після сушіння. Результати дослідження наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Зміна маси філаменту після сушки

ABS пластик					
№	Початкова маса, $m_{\text{поч}} (г)$	Маса вогнистої філаменту, $m_{\text{вог}} (г)$	Відсоток вологи, $W, \%$	Маса після сушки, $m_{\text{суш}} (г)$	Відсоток випарованої вологи після сушки, $W_s, \%$
1	5,00	5,02	0,1	5,01	95
2	4,98	5,00	0,1	4,99	95
3	5,01	5,03	0,1	5,00	95
PLA пластик					
1	5,96	6,08	2	5,97	90
2	6,02	6,14	2	6,03	90
3	5,99	6,11	2	6,00	90
PETG пластик					
1	6,11	6,13	0,13	6,11	95
2	6,05	6,07	0,13	6,08	94
3	6,18	6,21	0,13	6,18	95
Nylon пластик					
1	5,48	6,02	10	5,51	90
2	5,57	6,11	10	5,60	90
3	5,62	6,26	10	5,65	90

Виходячи з отриманих результатів можливо зробити наступні закономірності:

- ABS та PETG пластик, напитують менше всього вологи, а саме 0,1% для ABS пластику та 0,13% PETG пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,016 г та 0,02 г;
- PLA та Nylon пластик, напитують більше всього вологи, а саме 2,0% для PLA пластику та 10,0% Nylon пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,12 г та 0,54 г;
- всі пластики мають високий ступінь гідратації після примусового зволоження зразків в межах від 90% до 95% втрати вологи після сушки. Але ці познки можливо поліпшити при використанні більшої температури сушки в залежності від типу пластику та збільшення часу сушки.

Для перевірки якості надрукованих моделей, були надруковані по чотирьох тестові моделі з кожного типу пластику, щоб визначити на скільки примусова абсорбція та гідратація філаменту вплинуть на появу дефектів поверхні моделі.

Тестова модель для перевірки розмірами 20×20×20 мм, зображення на рис. 6.

Параметри друку для кожного типу пластику, є наступними:

- висота шару моделі 0,2 мм;
- кількість шарів стінки, кришки та дна моделі 3;
- заповнення моделі 15%;
- швидкість друку моделі 80 мм/с;

- температура екструдера для друку моделі: ABS пластик 230°C, PLA пластик 215°C, PETG пластик 240°C, Nylon пластик 260°C;
- температура стола, для ABS, PLA та PETG пластиків 60°C, а для Nylon пластику 80°C.

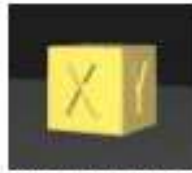


Рис.6. Тестова модель для дослідження

Результати друку тестових моделей наведені на рис. 7.



а) – зразок PLA пластику; б) – зразок PETG пластику;
в) – зразок ABS пластику; г) – зразок Nylon пластику
Рис.7. Результати тестових зразків на абсорбцію та гідратацію вологи

IV. ВИСНОВКИ

Виходячи з отриманих тестових моделей можливо спостерігати, що після циклу примусової абсорбції та гідратації філаменту, спостерігаються певні дефекти друкованої моделі, які пов'язані саме з проблемою матеріалу на не апаратно-програмної частини 3D-принтеру.

Навіть за результативним зміні маси філаменту після сушки та повернення значення до початкової величини, спостерігається певна деградація матеріалу навіть після повного циклу сушіння матеріалу.

Особливо проблеми з якістю матеріал спостерігаються на моделі виготовленій з ABS пластику. На поверхні моделі є напливи пластику, які утворилися у вхіді випаровування підчас екстракції пластику.

Це свідчить про те що, навіть після гідратації пластику та досягнення маси матеріалу 5,01 г від початкової маси 5 г. 0,01 г води потрапили до гіроскопічної структури філаменту. Це в свою чергу призвело до утворення бульбашок на поверхні тестової моделі. PLA та PETG пластик, мають більш кращий результат, і хоча критичних зонішніх дефектів не спостерігається, в моделях спостерігається делімітація по шарам друку виробу. Це призвело до підвищення міцності моделі. Особливо погана спайність шарів можливо побачити

на зразку з PETG пластику. Модель з Nylon пластику, має гарні стінки без суттєвих дефектів, але великі напливи на гранях тестової моделі. Також під час друку дужий сильно утворювалася пластикове налутиння, та напливи на соплі екструдера.

Виходячи з проведених досліджень можливо внести наступний висновок, що під час процесу абсорбції гідратації пластику ушкоджується структура прутка філаменту, що в свою чергу призводить до дефектів друку. Це явище можливо пояснити тим що, підчас абсорбції пластику вологою, волога потрапляє у мікро сколи та пори філаменту. Це призводить до того що коли відбувається процес гідратації пластику при високих значеннях температури вода в цих порах починає випаровуватися. Пар розширює цю пору та робить структуру прутка, ще більш ушкодженою.

Також ушкодження прутка іде не тільки по його поперечні а і в глибину, що дозволяє вологі ще глибше проникати в матеріал, та зберігатися в середині філаменту до самого початку друку.

Для того щоб зменшити ушкодження матеріалу для друку, необхідно вірно визначити параметри сушки, щоб процес випаровування вологи проходив більш лагідно по відношенню до структури філаменту. Для цього необхідно визначити як саме параметри гідратації філаменту впливають на якість друку пластику.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhoen "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.
- [2] Rossi, S.; Paglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem* 2018, 10, 1512- 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.
- [3] Нікітін, Д. О., Навлодков, І. Ш., Жарілова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. С. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1) (136), 42-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
- [4] Рагузов-Фригаок С.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. *Radiotekhnika*, 2(209), С. 206-214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>
- [5] Yuri Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // *Journal of the Technical University of Gabrovo*, vol.65, 2022.-p.p.1-6.

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Додаток Б
Результати дослідження

Таблиця Б.1 – Результати дослідження впливу параметрів сушки на вологість філаменту

Пластик	Початкова маса філаменту, г	Відсоток конвекції, %	Час сушки, години / Температура, °С	Маса пластику, г		
				40	45	50
PLA	6,02	25	4	5,99	5,98	5,96
	5,99		5	5,95	5,93	5,91
	6,0		6	5,95	5,93	5,91
	5,98	50	4	5,95	5,93	5,91
	6,04		5	6	5,98	5,96
	5,96		6	5,91	5,89	5,87
	5,97	75	4	5,94	5,92	5,9
	6,03		5	5,99	5,97	5,95
	5,99		6	5,94	5,92	5,9
	5,97	100	4	5,94	5,92	5,89
	6,01		5	5,97	5,95	5,92
	5,95		6	5,9	5,88	5,86
Пластик	Початкова маса філаменту, г	Відсоток конвекції, %	Час сушки, години / Температура, °С	Маса пластику, г		
PETG	6,11	25	4	6,08	6,07	6,06
	6,09		5	6,05	6,04	6,03
	6,14		6	6,09	6,08	6,07
	6,07	50	4	6,05	6,03	6,02
	6,09		5	6,06	6,04	6,03
	6,12		6	6,08	6,07	6,05
	6,08	75	4	6,05	6,04	6,02
	6,05		5	6,01	6	5,98
	6,11		6	6,06	6,04	6,03
	6,07	100	4	6,04	6,03	6
	6,09		5	6,05	6,48	6,01
	6,06		6	6,01	5,99	5,97
Пластик	Початкова маса філаменту, г	Відсоток конвекції, %	Час сушки, години / Температура, °С	Маса пластику, г		
ABS	5,03	25	2	5,01	5,09	4,99
	4,99		3	4,95	4,94	4,93
	5,01		4	4,96	4,95	4,94
	4,97	50	2	4,94	4,93	4,92
	4,99		3	4,95	4,94	4,93
	5,0		4	4,95	4,94	4,92
	5,02	75	2	4,99	4,97	4,96
	5,01		3	4,97	4,95	4,93
	5,06		4	5,01	4,99	4,96
	4,98	100	2	4,95	4,93	4,92
	5,02		3	4,98	4,96	4,92
	5,04		4	4,99	4,97	4,95

Продовження таблиці Б.1

Пластик	Початкова маса філаменту, г	Відсоток конвекції, %	Час сушки, години / Температура, °C	Маса пластику, г		
				75	80	85
Nylon	5,52	25	8	5,49	5,48	5,46
	5,68		9	5,64	5,63	5,61
	5,46		10	5,41	5,39	5,38
	5,68	50	8	5,65	5,63	5,61
	5,58		9	5,54	5,52	5,5
	5,45		10	5,4	5,38	5,36
	5,55	75	8	5,52	5,5	5,48
	5,53		9	5,49	5,47	5,44
	5,62		10	5,57	5,55	5,53
	5,72	100	8	5,69	5,67	5,64
	5,65		9	5,61	5,59	5,56
	5,59		10	5,54	5,52	5,27

ДОДАТОК В
ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

