

к. т. н., доцент, **Колосова О.П.**,
mrselkolosova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7795-6412
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
(Україна, м. Київ)

ПРОСТОРОВЕ МИСЛЕННЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ У ЦИФРОВУ ЕПОХУ: ТРАНСФОРМАЦІЯ ФУНКЦІЙ ТА РОЛЬ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ

У статті проаналізовано зміни у структурі та функціональній ролі інженерного мислення в умовах цифровізації проєктування та впровадження технологій штучного інтелекту. Показано, що сучасний етап розвитку інженерної діяльності характеризується переходом від безпосереднього формування геометричної моделі до роботи з результатами, згенерованими інтелектуальними системами. Це зумовлює зміну когнітивних підходів, що лежать в основі професійної діяльності інженера, та потребує переосмислення ролі просторового мислення.

На основі аналізу сучасних досліджень та практик інженерного проєктування обґрунтовано еволюцію когнітивних підходів: від мислення формою, характерного для традиційної інженерної графіки, через мислення операціями, притаманне САД-системам, до мислення оцінюванням і вибором рішень, згенерованих засобами штучного інтелекту. Встановлено, що у цих умовах просторове мислення змінює свою функціональну роль: від інструмента створення форми воно трансформується у засіб аналізу, інтерпретації, верифікації та прогнозування результатів моделювання.

Виявлено основні когнітивні ризики, пов'язані з використанням інтелектуальних систем у проєктуванні, зокрема зниження глибини інженерного аналізу, формування некритичної довіри до результатів генерації, ілюзію розуміння геометричної форми та обмеження самостійності мислення. Показано, що ці ризики пов'язані з розривом між процесом формування рішення та його осмисленням і можуть негативно впливати на якість інженерної підготовки.

Обґрунтовано, що геометрична підготовка є ключовим чинником формування здатності до аналізу та інтерпретації результатів генеративного проєктування. Вона забезпечує розвиток когнітивних механізмів, необхідних для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами моделі та її геометричною реалізацією, а також для критичної оцінки отриманих рішень. Доведено, що інтеграція геометричної підготовки з сучасними цифровими технологіями є необхідною умовою формування сучасного типу інженерного мислення.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення змісту інженерної освіти та розроблення нових методичних підходів до розвитку просторового мислення здобувачів вищої освіти.

***Ключові слова:** інженерне мислення; просторове мислення; STEM-дисципліни, геометрична підготовка; генеративне проектування; штучний інтелект у проектуванні; CAD-системи; інженерна освіта; когнітивні ризики; інтерпретація результатів моделювання; інженерне моделювання*

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку інженерної освіти характеризується суттєвими змінами у змісті та засобах професійної підготовки, зумовленими цифровізацією та впровадженням технологій штучного інтелекту. Перехід від традиційних форм графічної підготовки до використання CAD-систем і генеративного проектування (generative design) призводить до трансформації не лише інструментів діяльності інженера, а й характеру його когнітивної активності.

У цих умовах змінюється роль просторового мислення: якщо раніше воно формувалося як невід’ємна складова процесу побудови та аналізу геометричних моделей, то сьогодні дедалі частіше використовується на етапі оцінювання та інтерпретації вже згенерованих рішень. Водночас скорочення обсягу вивчення інженерної графіки та нарисної геометрії обмежує можливості природного формування просторових навичок у процесі навчання, що актуалізує потребу їх цілеспрямованого розвитку.

Таким чином, виникає суперечність між зростаючою роллю просторового мислення як інструменту аналізу та оцінювання результатів сучасних систем проектування та зменшенням уваги до його формування в освітньому процесі. Крім того, використання генеративних систем створює нові когнітивні виклики, пов’язані з необхідністю критичного осмислення, перевірки та обґрунтування отриманих рішень.

У зв’язку з цим постає проблема визначення ролі геометричної підготовки у формуванні просторового мислення майбутніх інженерів в умовах цифрового та III-орієнтованого проектування, а також обґрунтування підходів до його розвитку з урахуванням сучасних технологічних змін.

Аналіз останніх досліджень. Проблема розвитку просторового мислення в інженерній освіті є предметом активних досліджень як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. У більшості робіт просторове мислення розглядається як одна з ключових складових інженерного мислення, яка забезпечує здатність до уявлення форми, виконання уявних перетворень та аналізу просторових зв’язків між елементами об’єкта. Розвиток або вдосконалення навичок 3D-просторової візуалізації часто називають однією з головних цілей освіти з інженерного

дизайну та графіки [1]. За Sheryl A. Sorby, просторові навички історично формувалися як “побічний ефект” графічної освіти; сьогодні їх розвиток має бути винесений в окрему освітню мету.

В роботах [2–4, 8, 9] зазначається, що розвиток просторових навичок сприяє підвищенню успішності навчання та подальшої професійної діяльності в галузях математики, природничих наук, технологій, інформатики та інженерії (так званих STEM-дисциплін), причому їх наявність є вагомим фактором успішності у цих сферах.

У цьому контексті особливої уваги набуває питання засобів і методів формування просторового мислення в інженерній освіті. Зокрема, у працях українських дослідників підкреслюється роль нарисної геометрії та інженерної графіки як базових дисциплін, що формують відповідні когнітивні механізми та забезпечують перехід від наочно-образного до абстрактно-геометричного рівня мислення. [5–9].

Окремий напрям досліджень пов’язаний із впливом систем автоматизованого проектування на процес навчання [10–12]. У цих роботах САД-технології розглядаються як ефективний інструмент візуалізації та моделювання, що дозволяє працювати зі складними геометричними об’єктами та підвищує наочність навчального матеріалу. Водночас наголошується, що використання таких систем не завжди супроводжується достатнім рівнем осмислення геометричної сутності об’єктів, оскільки значна частина побудов виконується автоматично [13].

У зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється розробленню спеціальних методик розвитку просторових здібностей, зокрема на основі інтерактивних середовищ, ігрових платформ та технологій доповненої і віртуальної реальності [14–16]. Такі підходи демонструють позитивний вплив на формування навичок просторової візуалізації, особливо на початкових етапах навчання. Паралельно розвиваються педагогічні стратегії активного навчання, серед яких важливе місце займає проблемно-орієнтоване навчання (PBL) та проєктно-орієнтоване навчання [17–19]. У межах цих підходів просторове мислення формується у контексті практичної діяльності, однак його розвиток значною мірою залежить від рівня попередньої геометричної підготовки.

Останніми роками спостерігається активне впровадження технологій штучного інтелекту у сферу інженерного проектування. Зокрема, концепція генеративного проектування – інноваційного підходу, що використовує алгоритми штучного інтелекту та комп’ютерне моделювання для автоматичного створення численних варіантів конструкцій на основі заданих параметрів, обмежень і критеріїв оптимізації – набуває широкого застосування [20–22]. У таких системах користувач отримує множину готових рішень, серед яких необхідно здійснити обґрунтований вибір, що змінює характер інженерної діяльності та структуру когнітивного навантаження.

Разом із тим аналіз наукових джерел показує, що питання впливу технологій штучного інтелекту на розвиток просторового мислення досліджене недостатньо [22]. У більшості робіт увага зосереджується на ефективності інструментів, тоді як когнітивні аспекти взаємодії з ними залишаються поза належною увагою. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на визначення ролі просторового мислення в умовах використання інтелектуальних систем проектування.

Мета і завдання статті. Метою статті є обґрунтування зміни ролі просторового мислення в підготовці майбутніх інженерів в умовах цифровізації проектування та впровадження технологій штучного інтелекту, а також визначення місця геометричної підготовки у формуванні здатності до аналізу, оцінювання та інтерпретації результатів генеративного проектування.

Досягнення поставленої мети передбачає аналіз еволюції підходів до формування просторового мислення в інженерній освіті, визначення особливостей когнітивної діяльності інженера в умовах використання САД-систем і генеративного проектування, виявлення основних когнітивних ризиків, пов'язаних із застосуванням систем штучного інтелекту, обґрунтування зміни функцій просторового мислення від інструмента побудови до інструмента аналізу, оцінювання та прогнозування, а також уточнення ролі геометричної підготовки у формуванні здатності до інтерпретації та обґрунтованого вибору інженерних рішень.

Основна частина. Трансформація інженерної діяльності в умовах цифровізації та впровадження штучного інтелекту може бути інтерпретована як еволюція когнітивних підходів, що лежать в основі професійного мислення інженера. Ці зміни відображають переорієнтацію способів взаємодії з геометричною формою об'єкта та, відповідно, функцій просторового мислення. Узагальнення зазначених підходів дає змогу представити розвиток інженерного мислення у вигляді послідовності когнітивних моделей (рис. 1).

На початковому етапі інженерної практики домінує мислення формою, що передбачає безпосереднє оперування геометричними образами. Тут інженер виступає як суб'єкт, який конструює форму об'єкта, здійснюючи її аналіз, декомпозицію та синтез. Просторове мислення при цьому не лише забезпечує уявлення об'єкта, а й виступає інструментом його створення. Саме цей підхід лежить в основі класичної інженерної графіки та нарисної геометрії.

Подальший розвиток цифрових засобів проектування зумовлює перехід до мислення операціями, коли взаємодія з геометричною формою здійснюється опосередковано – через систему інструментів і команд. У такій моделі інженер не формує геометричний об'єкт безпосередньо, а організовує послідовність дій, що приводить до його побудови в програмному середовищі. Відповідно, просторове мислення втрачає

провідну функцію генерації форми та дедалі більше пов'язується з контролем і корекцією результатів виконаних операцій.



Рис. 1. Еволюція когнітивних підходів інженерного мислення в умовах цифровізації та використання штучного інтелекту

Сучасний етап розвитку інженерної діяльності характеризується формуванням третього когнітивного підходу — мислення, орієнтованого на оцінювання та вибір інженерних рішень, згенерованих системами штучного інтелекту (ШІ). Тепер геометрична форма об'єкта створюється алгоритмічно на основі заданих параметрів, обмежень і критеріїв оптимізації. Визначальними стають процеси оцінювання, інтерпретації та обґрунтованого вибору рішень, що зміщує когнітивну діяльність від безпосереднього конструювання до осмислення отриманих результатів.

Така еволюція не є лінійною заміною одного підходу іншим, а має характер нашарування, у межах якого нові форми мислення доповнюють попередні. Ефективне використання інструментів автоматизованого проєктування потребує сформованого уявлення про геометричну структуру об'єкта, тоді як інтерпретація результатів, отриманих за допомогою інтелектуальних систем, неможлива без здатності до їх просторового аналізу.

У цих умовах просторове мислення змінює свою функціональну роль: від інструмента безпосереднього створення форми воно переходить до засобу її аналізу, інтерпретації та верифікації. Це підвищує вимоги до рівня його сформованості та зумовлює необхідність переосмислення змісту інженерної підготовки, зокрема ролі геометричних дисциплін як основи формування відповідних когнітивних механізмів.

Зазначені зміни знаходять своє відображення у структурі інженерної діяльності в умовах використання штучного інтелекту (рис. 2).



Рис. 2. Зміна ролі інженера при використанні штучного інтелекту

Традиційно, в інженерній практиці центральним процесом була побудова геометричної моделі об'єкта, що передбачало активну участь інженера у формуванні структури. В умовах генеративного проектування значна частина цього процесу автоматизується, і інженер отримує множину вже сформованих варіантів рішень.

У такій ситуації змінюється його роль – від безпосереднього конструювання до відбору та оцінювання запропонованих варіантів. Об'єктом діяльності стає не процес створення моделі, а результат, отриманий унаслідок роботи алгоритму, що безсумнівно змінює характер когнітивних операцій. Виникає розрив між процесом формування рішення та його осмисленням. Інженер взаємодіє з результатами, логіка створення яких може бути недоступною або недостатньо прозорою, що ускладнює встановлення причинно-наслідкових зв'язків між заданими умовами та отриманою формою.

У результаті в роботі інженера стає актуальним новий тип завдань: задачі, пов'язані з необхідністю інтерпретації результатів, отриманих за допомогою інтелектуальних систем, що вимагає переосмислення ролі просторового мислення у професійній підготовці інженера.

Треба розуміти, що такі зміни в інженерній діяльності зумовлюють виникнення низки когнітивних ризиків, які безпосередньо впливають на якість професійної підготовки (рис. 3).



Рис. 3. Когнітивні ризики інженерного проектування з використанням ШІ

Передусім, йдеться про ризик зниження глибини інженерного аналізу як складової професійного мислення. В умовах, коли процес формоутворення делегується алгоритмічним системам, зменшується потреба у виконанні уявних просторових перетворень та самостійному конструюванні геометричних моделей. У результаті просторове мислення втрачає свою продуктивну функцію і поступово зводиться до рівня формального сприйняття згенерованих об'єктів.

Іншим суттєвим ризиком є формування некритичної довіри до результатів, отриманих за допомогою інтелектуальних систем. Складність і непрозорість алгоритмів сприяють сприйняттю згенерованих рішень як апіорно коректних, що зміщує акцент із аналітичної оцінки на їх прийняття як даності.

Пов'язаним із цим є ризик формування ілюзії розуміння геометричної форми. Високий рівень візуалізації сучасних моделей створює враження повного усвідомлення їх структури, тоді як аналіз закономірностей формоутворення, граничних умов та внутрішніх зв'язків між елементами залишається недостатнім.

Крім того, знижується здатність до верифікації отриманих результатів. За відсутності сформованих навичок геометричного аналізу інженер втрачає можливість незалежно оцінювати коректність згенерованих моделей, особливо у випадках, що виходять за межі стандартних рішень.

Сукупність зазначених факторів свідчить про тенденцію до зниження самостійності мислення інженера, що проявляється у зростанні залежності від інструментальних можливостей системи та обмеженні здатності до самостійного аналізу. Це змінює характер інженерної

компетентності, зміщуючи її від аналітичної до інструментальної складової.

Попри зазначені ризики, просторове мислення не втрачає своєї значущості, а змінює функціональну роль (рис. 4). Воно перестає бути виключно інструментом побудови геометричної форми і набуває функцій аналізу, інтерпретації, верифікації та прогнозування результатів моделювання.



Рис. 4. Функціональні зміни просторового мислення в умовах цифровізації

Змінюється характер взаємодії з геометричним об'єктом. Якщо раніше просторове мислення забезпечувало процес формоутворення, то в умовах використання генеративних алгоритмів воно дедалі більше орієнтується на аналіз уже сформованої структури та виявлення її внутрішньої логіки. Це передбачає здатність до декомпозиції складних об'єктів, встановлення зв'язків між їх елементами та реконструкції принципів їх побудови.

Важливою функцією просторового мислення стає інтерпретація результатів генерації, яка проявляється як здатність пояснювати отримані результати. Інженер повинен не лише сприймати геометричну форму, а й розуміти причини її виникнення, співвідносити її з вихідними умовами та оцінювати відповідність поставленим задачам. У цьому контексті просторове мислення виступає як засіб встановлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами моделі та її геометричною реалізацією.

Не менш важливою є верифікаційна функція, яка полягає у перевірці коректності згенерованих рішень. Просторове мислення дозволяє

виявляти потенційні суперечності у формі об'єкта, оцінювати його конструктивну доцільність та передбачати можливі проблеми при реалізації. Саме ця функція забезпечує незалежність інженера від результатів роботи алгоритму та підтримує його самостійність мислення.

Окрім цього, просторове мислення виконує прогностичну функцію: уявне моделювання поведінки об'єкта в різних умовах. Незважаючи на наявність чисельних методів аналізу, здатність до попередньої якісної оцінки залишається важливою складовою інженерної діяльності, особливо на етапах вибору та обґрунтування рішень.

Таким чином, у сучасних умовах просторове мислення перестає бути виключно інструментом створення геометричної форми і набуває функцій її аналізу та осмислення. Це не зменшує його значущості, а, навпаки, підвищує вимоги до рівня його сформованості, оскільки від здатності інженера інтерпретувати результати залежить якість прийнятих рішень, що визначає необхідність збереження геометричної складової інженерної підготовки як її фундаментальної основи.

Виникає необхідність переосмислення ролі геометричної підготовки в системі інженерної освіти. Якщо у традиційних підходах геометричні дисципліни розглядалися передусім як засіб формування навичок побудови та читання креслеників, то в сучасних умовах їх значення визначається здатністю забезпечувати аналіз, інтерпретацію та верифікацію результатів моделювання (рис. 5).



Рис. 5. Роль геометричної підготовки у формуванні здатності до інтерпретації результатів генеративного проектування

Особливість сучасної інженерної діяльності полягає в тому, що об'єкт аналізу дедалі частіше постає у вигляді складної геометричної структури, сформованої без безпосередньої участі інженера. У таких

умовах ефективність професійної діяльності визначається не здатністю відтворити форму, а здатністю її пояснити.

Геометричні дисципліни забезпечують розвиток умінь, необхідних для декомпозиції об'єкта, виявлення його структурних елементів та встановлення взаємозв'язків між ними, що є критично важливим для реалізації інтерпретаційної та верифікаційної функцій просторового мислення.

Крім того, геометрична підготовка формує внутрішні критерії оцінювання інженерних рішень. За відсутності таких критеріїв процес вибору між альтернативними варіантами, згенерованими інтелектуальними системами, набуває формального характеру. Натомість сформоване геометричне мислення дозволяє здійснювати відбір на основі розуміння закономірностей формоутворення, а не лише за зовнішніми ознаками або числовими показниками.

Геометрична підготовка не суперечить використанню сучасних цифрових технологій, а виступає необхідною умовою їх ефективного застосування, перетворюючи взаємодію з інструментами на усвідомлену інженерну діяльність.

У сучасних умовах вона перестає бути лише етапом базової освіти і виступає як фундаментальний компонент формування здатності до критичного аналізу та інтерпретації результатів інженерного моделювання, що зумовлює необхідність її збереження та подальшого розвитку в системі інженерної освіти.

Водночас пошук ефективних педагогічних підходів до розвитку просторового мислення є актуальним. У сучасній інженерній освіті дедалі ширше застосовуються активні методи навчання, зокрема проблемно-орієнтоване (Problem-Based Learning, PBL) та проєктно-орієнтоване навчання, які передбачають залучення студентів до розв'язання практично значущих задач. Такі підходи створюють умови для формування навичок аналізу, прийняття рішень та роботи з невизначеністю.

Але ефективність зазначених методик теж значною мірою залежить від рівня геометричної підготовки студентів. За відсутності сформованих просторових уявлень та навичок геометричного аналізу діяльність у межах проблемно-орієнтованого навчання може зводитися до інструментального використання програмних засобів без глибокого осмислення отриманих результатів. Тобто, геометрична підготовка виступає не альтернативою сучасним освітнім технологіям, а їх необхідною когнітивною основою.

Таким чином, інтеграція традиційної геометричної підготовки з активними методами навчання створює передумови для формування сучасного типу інженерного мислення, здатного поєднувати використання цифрових інструментів із їх критичною інтерпретацією.

Висновки й перспективи досліджень. У роботі обґрунтовано, що впровадження технологій штучного інтелекту в інженерне проєктування зумовлює не лише зміну інструментів діяльності, а й трансформацію

когнітивних підходів, що лежать в основі професійного мислення інженера. Показано, що перехід від безпосереднього формування геометричної моделі до роботи з результатами генерації змінює функціональну роль просторового мислення: від інструмента створення форми воно трансформується у засіб аналізу, інтерпретації, верифікації та прогнозування. Встановлено, що зазначені зміни супроводжуються виникненням когнітивних ризиків, пов'язаних зі зниженням глибини аналізу, формуванням некритичної довіри до результатів та обмеженням самостійності мислення.

Доведено, що геометрична підготовка відіграє ключову роль у подоланні зазначених ризиків, оскільки забезпечує формування когнітивних механізмів, необхідних для осмислення та оцінювання результатів генеративного проектування. Вона виступає не альтернативою цифровим технологіям, а їх фундаментальною основою, що визначає якість інженерних рішень в умовах використання інтелектуальних систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методичних підходів до інтеграції геометричної підготовки з сучасними цифровими інструментами, а також із створенням дидактичних моделей розвитку просторового мислення, орієнтованих на формування здатності до аналізу та інтерпретації результатів, отриманих за допомогою штучного інтелекту. Окремого вивчення потребує експериментальна перевірка ефективності таких підходів у процесі підготовки майбутніх інженерів.

Література

1. Sorby, S. A. (2000). Spatial abilities and their relationship to effective learning of 3-D modeling software. *Engineering Design Graphics Journal*, 64(3), 30-35.
2. Uttal D. H., Meadow N. G., Tipton E. et al. The malleability of spatial skills: A Meta-Analysis of Training Studies / *Psychological Bulletin*. 2012. Vol. 139(2). P. 352–402. DOI: 10.1037/a0028446
3. Wai J., Lubinski D., Benbow C. P. Spatial ability for STEM domains: : Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance / *Journal of Educational Psychology*. 2009. Vol. 101. P. 817–835. DOI: 10.1037/a0016127
4. Hegarty M. Components of spatial intelligence / *Psychology of Learning and Motivation*. 2010. Vol. 62. P. 265–297. DOI: 10.1016/S0079-7421(10)52007-3
5. Ванін В. В., Вірченко Г. А., Яблонський П. М. Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 223 с. <https://lnk.ua/U1ipZ8jgv>
6. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Яблонський П.О. До питання узагальнення структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів /

- Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2020. Вип. 99. С. 56–64. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.99.56-64>
7. Баскова Г. В., Колосова О. П., Міхлевська Н. В. Проблеми та шляхи реалізації дистанційного вивчення теми «Ескізи і робочі кресленики деталей»: методичні підходи та виклики інженерної графіки / *Сучасні проблеми моделювання*. 2025. Вип. 27. С. 1224. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-12-24>
8. Ботвіновська С.І., Ніколаєнко Т.П., Куновська А., Болботенко В. Використання сучасних педагогічних технологій в курсі проєктивної графіки для студентів спеціальності «Образотворче мистецтво» / *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ : КНЦБА, 2020. Вип. 99. С. 28–42. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.99.28-42>
9. Ботвіновська С.І., Ніколаєнко Т.П., Григорчук В.І., Бондаренко Р.С. Вдосконалення графічної підготовки студентів-першокурсників дизайнерських спеціальностей / *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ. КНУБА, 2020. Вип. 97. С. 3–15. doi.org/10.32347/0131-579x.2020.97.3-15. http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/195056/pdf_2.
10. Chester I. Teaching for CAD expertise / *International Journal of Technology and Design Education*. 2007. Vol. 17. P. 23–35. <https://eric.ed.gov/?id=EJ813279>
11. Strong S., Smith R. Spatial visualization: Fundamentals and trends / *Journal of Engineering Education*. 2001. Vol. 18(1). P. 343–348.
12. Branoff T. J. The Effects of Adding Coordinate Axes to a Mental Rotations Task in Measuring Spatial Visualization Ability in Introductory Undergraduate Technical Graphics Course / *Engineering Design Graphics Journal*. 1998. Volume 62, Issue 2. P. 16–34.
13. Panther G., Duffy G., Sorby S., Soni D. Analyzing the relationship between spatial skills... / *Australasian Journal of Engineering Education*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/22054952.2026.2626163>
14. Xiao Z. et al. Cubicle: An adaptive educational gaming platform... / Proc. IUI '18. 2018. P. 91–101. DOI: <https://doi.org/10.1145/3172944.3172954>
15. Radianti J., Majchrzak T. A., Fromm J., Wohlgenannt I. A systematic review of immersive VR / *Computers & Education*. 2020. Vol. 147. DOI: [10.1016/j.compedu.2019.103778](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778)
16. Makransky G., Petersen G. Immersive VR and learning / *Educational Psychology Review*. 2019. 113(4):719-735 DOI: [10.1037/edu0000473](https://doi.org/10.1037/edu0000473)
17. Prince M., Felder R. Inductive teaching and learning methods / *Journal of Engineering Education*. 2006. Vol. 95. Pp.123-137. DOI: [10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x](https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x)
18. O'Connor S., Power J., Blom N., Tanner D. Engineering students' perceptions of PBL / *Australasian Journal of Engineering Education*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/22054952.2025.2493419>

19. *Hmelo-Silver C.* Problem-based learning. What and How Do Students Learn? / *Educational Psychology Review*. 2004. Vol, 6(3). Pp. 235-266. DOI: 10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3
20. *Shea K., Aish R., Gourtovaia M.* Towards integrated performance-driven generative design / *Automation in Construction*. 2005.
21. Autodesk. Generative design in engineering (white papers). 2020.
22. *Dellermann D. et al.* AI-based systems in engineering design / *Business & Information Systems Engineering*. 2019, Vol, 61(5). Pp.637–643
<https://doi.org/10.1007/s12599-019-00595-2>

References

1. *Sorby, S. A.* (2000). Spatial abilities and their relationship to effective learning of 3-D modeling software. *Engineering Design Graphics Journal*, 64(3), 30-35.
2. *Uttal D. H., Meadow N. G., Tipton E. et al.* The malleability of spatial skills: A Meta-Analysis of Training Studies / *Psychological Bulletin*. 2012. Vol. 139(2). P. 352–402. DOI: 10.1037/a0028446
3. *Wai J., Lubinski D., Benbow C. P.* Spatial ability for STEM domains: : Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance / *Journal of Educational Psychology*. 2009. Vol. 101. P. 817–835. DOI: 10.1037/a0016127
4. *Hegarty M.* Components of spatial intelligence / *Psychology of Learning and Motivation*. 2010. Vol. 62. P. 265–297. DOI: 10.1016/S0079-7421(10)52007-3
5. *Vanin, V. V., Virchenko, H. A.* (2010). Structural-parametric geometric modeling. *Geometric and Computer Modeling*, Issue 23, 42–48. {in Ukrainian}
6. *Vanin, V. V., Virchenko, H. A., Yablonskyi, P. O.* (2020). On the generalization of structural-parametric shape formation of technical objects. *Applied Geometry and Engineering Graphics*, Issue 99, 56–64. {in Ukrainian}
7. *Baskova, H. V., Kolosova, O. P., Mikhlevska, N. V.* (2025). Problems and ways of implementing distance learning of the topic “Sketches and working drawings of parts”: methodological approaches and challenges of engineering graphics. *Modern Problems of Modeling*, Issue 27, 12–24. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-12-24> {in Ukrainian}.
8. *Botvinovska, S. I., Nikolaenko, T. P., Kunovska, A., & Bolbotenko, V.* (2020). Vykorystannia suchasnykh pedahohichnykh tekhnolohii v kursi proektyvnoi hrafiky dlia studentiv spetsialnosti "Obrazotvorche mystetstvo" [Using modern pedagogical technologies in the course of projective graphics for students of the specialty "Fine Arts"]. *Prikladnaia Geometryia i Inzhenernaia Grafika [Applied Geometry and Engineering Graphics]*, (99), 28–42. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.99.28-42>
9. *Botvinovska, S. I., Nikolaenko, T. P., Hryhorchuk, V. I., & Bondarenko, R. S.* (2020). Vdoskonalennia hrafichnoi pidhotovky studentiv-pershokursnykiv

- dyzainerskykh spetsialnostei [Improving the graphic training of first-year students of design specialties]. *Prikladnaia Geometriya i Inzhenernaia Grafika [Applied Geometry and Engineering Graphics]*, (97), 3–15. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.97.3-15>
10. Chester I. Teaching for CAD expertise / *International Journal of Technology and Design Education*. 2007. Vol. 17. P. 23–35. <https://eric.ed.gov/?id=EJ813279>
 11. Strong S., Smith R. Spatial visualization: Fundamentals and trends / *Journal of Engineering Education*. 2001. Vol. 18(1). P. 343–348.
 12. Branoff T. J. The Effects of Adding Coordinate Axes to a Mental Rotations Task in Measuring Spatial Visualization Ability in Introductory Undergraduate Technical Graphics Course / *Engineering Design Graphics Journal*. 1998. Volume 62, Issue 2. P. 16–34.
 13. Panther G., Duffy G., Sorby S., Soni D. Analyzing the relationship between spatial skills... / *Australasian Journal of Engineering Education*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/22054952.2026.2626163>
 14. Xiao Z. et al. Cubicle: An adaptive educational gaming platform... / *Proc. IUI '18*. 2018. P. 91–101. DOI: <https://doi.org/10.1145/3172944.3172954>
 15. Radianti J., Majchrzak T. A., Fromm J., Wohlgenannt I. A systematic review of immersive VR / *Computers & Education*. 2020. Vol. 147. DOI: 10.1016/j.compedu.2019.103778
 16. Makransky G., Petersen G. Immersive VR and learning / *Educational Psychology Review*. 2019. 113(4):719-735 DOI: 10.1037/edu0000473
 17. Prince M., Felder R. Inductive teaching and learning methods / *Journal of Engineering Education*. 2006. Vol. 95. Pp.123-137. DOI: 10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x
 18. O'Connor S., Power J., Blom N., Tanner D. Engineering students' perceptions of PBL / *Australasian Journal of Engineering Education*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/22054952.2025.2493419>
 19. Hmelo-Silver C. Problem-based learning. What and How Do Students Learn? / *Educational Psychology Review*. 2004. Vol, 6(3). Pp. 235-266. DOI: 10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3
 20. Shea K., Aish R., Gourtovaia M. Towards integrated performance-driven generative design / *Automation in Construction*. 2005.
 21. Autodesk. Generative design in engineering (white papers). 2020.
 22. Dellermann D. et al. AI-based systems in engineering design / *Business & Information Systems Engineering*. 61(5):637–643 (2019) <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00595-2>

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, **Olena Kolosova**
 mrselkolosova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7795-6412
 National Technical University of Ukraine
 “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
 (Kyiv, Ukraine)

SPATIAL THINKING OF FUTURE ENGINEERS IN THE DIGITAL ERA: THE ROLE OF GEOMETRIC TRAINING

The paper examines the transformation of engineering thinking in the context of the digitalization of design processes and the integration of artificial intelligence technologies. It is shown that the current stage of engineering practice is characterized by a shift from the direct construction of geometric models to working with solutions generated by intelligent systems. This shift leads to changes in the cognitive approaches underlying professional engineering activity and requires a reconsideration of the role of spatial thinking. Based on an analysis of contemporary research and engineering design practices, the evolution of cognitive approaches is substantiated: from shape-based thinking characteristic of traditional engineering graphics, through operation-based thinking associated with CAD systems, to thinking focused on the evaluation and selection of solutions generated by artificial intelligence. It is established that under these conditions spatial thinking changes its functional role, evolving from a tool for creating form into a means of analysis, interpretation, verification, and prediction of modeling results. The study identifies the main cognitive risks associated with the use of intelligent systems in design, including a decrease in the depth of engineering analysis, the formation of uncritical trust in generated results, the illusion of understanding geometric structures, and reduced independence of thinking. It is shown that these risks arise from the gap between the process of generating solutions and their comprehension, which may negatively affect the quality of engineering education.

It is argued that geometric training plays a key role in overcoming these challenges, as it provides the cognitive mechanisms necessary for analyzing and interpreting the results of modern design processes. Geometric education is not an alternative to digital technologies but rather a fundamental basis for their effective use, ensuring the quality and validity of engineering decisions. The findings can be used to improve the content of engineering education and to develop methodological approaches to fostering spatial thinking in the context of artificial intelligence.

Keywords: engineering thinking; spatial reasoning; STEM fields; geometric education; generative design; artificial intelligence in engineering design; CAD systems; engineering education; cognitive risks; interpretation of modeling results; engineering modeling