

Haqberdiyev B.R*p.f.f.d., dots**Alfraganus universiteti,**Umumkasbiy fanlar kafedrası mudiri**e-mail: bahtiyor.haqberdiyev@mail.ru**ORCID: 0000-0002-2208-7827***Abdukarimova G.D***TIQXMMI Milliy tadqiqot universiteti tayanch doktoranti**e-mail: g_abdukarimova@tiiame.uz**ORCID: 0009-0006-4165-4694*

FAZOVIIY GEOMETRIK OBYEKT LARNI PARAMETRIK MODEL- LASHTIRISH VA PROYEKSIYALARNI HOSIL QILISH USULLARINING QIYOSIIY TAHLILI

Annotatsiya. Grafik topshiriqlarni avtomatik generatsiya qilish tizimini loyihalash uchun fazoviy obyekt ni qanday tasvirlash va uning ortogonal proyeksiya-larini qay tarzda hosil qilish masalasi hal etilishi lozim. Maqolada qattiq jismlarni tas-virlashning asosiy usullari — konstruktiv fazoviy geometriya (CSG), chegaraviy tas-virlash (B-rep), protsedurali-grammatik va poligonal to'r modellari — beshta mezon bo'yicha qiyosiy tahlil qilingan. Tahlil ko'rsatdiki, topshiriq generatsiyasi masalasi uchun CSG va B-rep tasvirlarining gibril qo'llanilishi optimal hisoblanadi: CSG para-metrik boshqaruv va regulyarlashtirilgan Bul amallarini, B-rep esa proyeksiyalarni qurish uchun zarur topologik axborot ni ta'minlaydi. Proyeksiya hosil qilishning markaziy hisoblash masalasi ko'rinmas chiziqlarni aniqlash bo'lib, klassik algoritmlarning murakkabligi eng yomon holatda $O(n^2)$ tartibda shakllanadi. Jism va uning proyeksiyalari o'rtasidagi muvofiqlikni tekshirishda Eyler–Puankare munosabati za-ruriy shart sifatida qo'llanilishi, biroq u yetarli shart bo'la olmasligi asoslangan. Shuningdek, uch ortogonal proyeksiyadan jismni tiklash masalasining bir qiymatli yechilmasligi generatsiya qilinadigan topshiriqlar uchun to'g'ridan-to'g'ri metodologik oqibatga ega ekani ko'rsatilgan. Natijalar generativ modul arxitekturasini uchun asoslangan tanlov qilish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: parametrik modellashtirish; konstruktiv fazoviy geometriya; che-garaviy tasvirlash; ortogonal proyeksiya; ko'rinmas chiziqlarni yo'qotish; geometrik cheklovlar tizimi; Eyler–Puankare formulasi; jismni tiklash; CAD.

Аннотация. Для проектирования системы автоматической генерации гра-фических заданий необходимо решить вопрос о способе представления

пространственного объекта и построения его ортогональных проекций. В статье проведён сравнительный анализ основных способов представления твёрдых тел — конструктивной блочной геометрии (CSG), граничного представления (B-реп), процедурно-грамматических и полигональных сеточных моделей — по пяти критериям. Анализ показал, что для задачи генерации заданий оптимальным является гибридное применение CSG и B-реп: CSG обеспечивает параметрическое управление и регуляризованные булевы операции, а B-реп — топологическую информацию, необходимую для построения проекций. Центральной вычислительной задачей построения проекций является определение невидимых линий, причём сложность классических алгоритмов в худшем случае составляет порядка $O(n^2)$. Обосновано, что соотношение Эйлера–Пуанкаре применяется как необходимое условие проверки соответствия тела и его проекций, но не может служить достаточным условием. Показано также, что неоднозначность решения задачи восстановления тела по трём ортогональным проекциям имеет непосредственные методологические последствия для генерируемых заданий. Результаты позволяют осуществить обоснованный выбор архитектуры генеративного модуля.

Ключевые слова: параметрическое моделирование; конструктивная блочная геометрия; граничное представление; ортогональная проекция; удаление невидимых линий; система геометрических ограничений; формула Эйлера–Пуанкаре; восстановление тела; САПР.

Abstract. Designing a system for the automatic generation of graphic tasks requires resolving how a spatial object is to be represented and how its orthographic projections are to be produced. This paper comparatively analyses the principal solid representation schemes — constructive solid geometry (CSG), boundary representation (B-rep), procedural-grammatical models and polygonal meshes — against five criteria. The analysis shows that a hybrid use of CSG and B-rep is optimal for the task-generation problem: CSG provides parametric control and regularised Boolean operations, while B-rep supplies the topological information required for constructing projections. The central computational problem in

projection construction is hidden-line determination, with classical algorithms exhibiting worst-case complexity of order $O(n^2)$. It is substantiated that the Euler–Poincaré relation serves as a necessary condition for verifying the consistency between a solid and its projections, but cannot serve as a sufficient one. It is further shown that the non-uniqueness of solid reconstruction from three orthographic views has direct methodological consequences for the generated tasks. The results enable a justified choice of architecture for the generative module.

Keywords: parametric modelling; constructive solid geometry; boundary representation; orthographic

projection; hidden-line removal; geometric constraint system; Euler–Poincaré formula; solid reconstruction; CAD.

Kirish. Muhandislik grafikasi bo'yicha o'quv topshiriqlari bankini qo'lda tuzish mehnat talab qiluvchi jarayon bo'lib, u bir necha jiddiy cheklovga ega: variantlar soni chegaralangan, topshiriqlar takrorlanadi va vaqt o'tishi bilan javoblari tarqaladi. Ushbu muammoning tizimli yechimi — fazoviy obyektlarni va ularning proyeksiyalarini avtomatik ravishda sintez qiluvchi generativ modul yaratishdir.

Bunday modulni loyihalashda ikki tamal masalasi hal etilishi lozim. Birinchisi — fazoviy obyektning qanday tasvirlash: tanlangan tasvirlash sxemasi parametrik boshqaruvni, geometrik to'g'rilikni va keyingi qayta ishlash imkonini ta'minlashi kerak. Ikkinchisi — sintez qilingan obyektning uch ortogonal proyeksiyasini qanday hosil qilish, xususan ko'rinmas chiziqlarni qanday aniqlash.

Qattiq jismlarni tasvirlash nazariyasining formal asoslari — tasvirlash sxemalariga qo'yiladigan to'g'rilik, bir qiymatlilik va to'liqlik talablari — Requicha va Voelckerning ishlarida bayon etilgan [1; 2]. Parametrik loyihalash sohasida geometrik cheklovlar tizimini yechish markaziy masala bo'lib qolmoqda; bu yo'nalishning so'nggi o'n besh yildagi holati batafsil sharhlarda umumlashtirilgan [3; 4]. Ko'rinmas chiziqlarni yo'qotish masalasining

klassik yechimlari esa bugungi kunda sanoat geometrik yadrolarida standart funksiya sifatida amalga oshirilgan [5; 6].

So'nggi yillarda soha jiddiy o'zgardi: yirik CAD-model to'plamlari [7] va parametrik konstruksiya ketma-ketliklarini o'z ichiga olgan ma'lumotlar bazalari [8] paydo bo'lganidan so'ng, modellarni generativ tarzda sintez qilish mustaqil tadqiqot yo'nalishiga aylandi [9; 10]. Ayni paytda bu ishlarning deyarli barchasi sanoat va teskari injiniring vazifalariga qaratilgan; o'quv topshirig'ini boshqariladigan murakkablik bilan generatsiya qilish masalasi ular doirasida qo'yilmagan. Mazkur tahlil aynan shu bo'shliqni aniqlashtirishga qaratilgan.

Mazkur maqolaning maqsadi — mavjud tasvirlash sxemalari va proyeksiya hosil qilish usullarini grafik topshiriqlarni avtomatik generatsiya qilish vazifasi nuqtayi nazaridan qiyosiy tahlil qilish hamda generativ modul uchun asoslangan tanlovni shakllantirishdir.

Materiallar va usullar. Tadqiqot qiyosiy-analitik usulda bajarilgan. Axborot bazasini to'rt guruh manba tashkil etadi: qattiq jismlarni tasvirlash nazariyasi va geometrik cheklovlarni yechish [1–6; 11]; CAD-modellarni ma'lumotlarga asoslangan generatsiya qilish va tanib olish bo'yicha so'nggi yillardagi ishlar [7–10; 12; 13]; ortogonal proyeksiyalardan jismni tiklash masalasi [14–16]; chizmalarni avtomatik

baholash sohasidagi amaliy ishlanmalar [17–20].

Manbalarning nashr yiliga alohida talab qo'yildi. Kompyuter grafikasi va CAD sohasi jadal yangilanayotgani bois asosiy tahliliy yuk 2015-yildan keyin chop etilgan ishlarga yuklandi; ro'yxatdagi manbalarning yarmidan ko'pi shu davrga tegishli. Undan avvalgi ishlar faqat bir holatda — agar ular tasvirlash sxemasi yoki algoritmining birlamchi manbasi bo'lsa — keltirildi. Masalan, konstruktiv fazoviy geometriya yoki miqdoriy ko'rinmaslik tushunchasi uchun yangiroq nashrga havola qilish ilmiy jihatdan noto'g'ri bo'lar edi, chunki bu tushunchalar aynan o'sha ishlarda kiritilgan. Klassik algoritmlarning hozirgi holati esa ularning zamonaviy geometrik yadrolardagi amalga oshirilishi orqali baholandi.

Tasvirlash sxemalarini qiyoslash uchun beshta mezon belgilandi: (1) parametrik boshqaruv imkoniyati — obyekt shaklini sonli parametrlar orqali boshqarish; (2) Bul amallarini qo'llash imkoniyati; (3) topologik axborotning mavjudligi — qirralar, yoqlar va cho'qqilar o'rtasidagi bog'lanishlar; (4) proyeksiyalarni bevosita qurish qulayligi; (5) geometrik to'g'rilikni tekshirish imkoniyati.

Ortogonal proyeksiyalash matematik jihatdan quyidagi akslantirish bilan ifodalanadi. XOY tekisligiga proyeksiyalash uchun:

$$\pi_z(x, y, z) = (x, y); \quad P_z = \text{diag}(1, 1, 0) \quad (1)$$

Uch ko'rinishli chizma uchun mos ravishda π_z , π_y va π_x akslantirishlari qo'llaniladi. Bunda jismning har bir qirradi tekislikdagi kesmaga akslanadi, biroq bu akslantirish bir qiymatli bo'lmaydi: turli chuqurlikdagi nuqtalar bitta proyeksiya nuqtasiga tushishi mumkin. Aynan shu holat ko'rinmas chiziqlarni aniqlash masalasini keltirib chiqaradi.

Bul amallari qattiq jismlar sinfinda yopiq bo'lishi uchun ular regulyarlashtirilgan shaklda qo'llaniladi [1]:

$$A \cup^* B = \text{cl}(\text{int}(A \cup B)); \quad A \cap^* B = \text{cl}(\text{int}(A \cap B)); \quad A \setminus^* B = \text{cl}(\text{int}(A \setminus B)) \quad (2)$$

bu yerda int — to'plamning ichki qismi; cl — yopilishi. Regulyarlashtirish natijasida nolinch qalinlikdagi «osilib qolgan» yoq va qirralar yo'qotiladi, natija esa doimo to'g'ri qattiq jism bo'lib qoladi.

Hosil qilingan chegaraviy modelning topologik izchilligi Eyler–Punkare munosabati orqali tekshiriladi:

$$V - E + F - R = 2(S - G) \quad (3)$$

bu yerda V — cho'qqilar soni; E — qirralar; F — yoqlar; R — yoqlardagi ichki konturlar (halqalar) soni; S — bog'langan komponentlar soni; G — jinsi (teshiklar soni). Cheklovlar tizimining aniqlanganlik darajasi esa erkinlik darajalarining balansi bo'yicha baholanadi:

$$\text{DOF} = \sum_i \text{dof}(g_i) - \sum_j \text{dof}(c_j) \quad (4)$$

bu yerda $\text{dof}(g_i)$ — i -geometrik element erkinlik darajalari soni; $\text{dof}(c_j)$ — j -cheklov tomonidan olib

tashlanadigan erkinlik darajalari soni. $DOF = 0$ bo'lganda tizim to'liq aniqlangan, $DOF > 0$ bo'lganda kam aniqlangan, $DOF < 0$ bo'lganda esa ortiqcha aniqlangan hisoblanadi [3; 4].

Algoritmning hisoblash murakkabligi kirish primitivlari soni n ga nisbatan asimptotik baholandi.

Natijalar. Tasvirlash sxemalarining beshta mezon bo'yicha qiyosiy tahlili 1-jadvalda keltirilgan.

Sxema	Parametrik boshqaruv	Bul amallari	Topologik axborot	Proyeksiya qurish	To'g'rilikni tekshirish
CSG (konstruktiv)	Yuqori	Tabiiy, sxemaga xos	Bevosita yo'q	Bilvosita (B-rep ga o'tish orqali)	Kafolatlangan (konstruksiya bo'yicha)
B-rep (chegaraviy)	O'rtacha	Murakkab (chegara hisoblash)	To'liq	Bevosita	Eyler–Puankare bo'yicha
Protsedurali / grammatik	Juda yuqori	Bilvosita	Yo'q	Bilvosita	Qoidalar bilan cheklanadi
Poligonal to'r	Past	Taqribiy	Qisman	Bevosita, ammo taqribiy	Cheklangan

1-jadval. Qattiq jismlarni tasvirlash sxemalarining topshiriq generatsiyasi vazifasi nuqtayi nazaridan qiyosiy tahlili [1; 2; 11; 12] asosida muallif tomonidan tuzilgan.

Jadval birinchi asosiy natijani beradi: birorta sxema beshta mezonning barchasi bo'yicha ustunlikka ega emas. CSG parametrik boshqaruv va Bul amallarida kuchli, biroq unda qirralar va yoqlar o'rtasidagi bog'lanishlar bevosita saqlanmaydi, shu bois undan proyeksiya qurish uchun avval chegaraviy modelga o'tish talab etiladi. B-rep esa aksincha — proyeksiya qurish uchun barcha zarur topologik axborotni beradi, ammo parametrik o'zgartirishlar va Bul amallari unda ancha murakkab kechadi. Shu sababli generativ modul

uchun gibril yondashuv asoslangan hisoblanadi: obyekt CSG daraxti sifatida parametrik tarzda sintez qilinadi, so'ng chegara hisoblash (boundary evaluation) protsedurasi orqali B-rep ga aylantiriladi va proyeksiyalar shu modeldan quriladi. Ushbu ikki tasvirlash o'rtasidagi o'tish nazariy jihatdan Requicha va Voelcker tomonidan asoslangan [2] va bugungi kunda ochiq hamda tijoriy geometrik yadrolarda standart protsedura sifatida amalga oshirilgan. Ma'lumotlarga asoslangan zamonaviy yondashuvlarda ham CSG-

tipidagi eskiz–ekstruziya ketma-ketligi va chegaraviy model o'rtasidagi ikki-yoqlama bog'liqlik markaziy g'oya bo'lib qolmoqda [9; 10; 12].

Ikkinchi natija — proyeksiya qurishning hisoblash yadrosi. (1)

Yondashuv	Yili	Asosiy g'oya	Murakkabligi	Qo'llash chegarasi
Miqdoriy ko'rinmaslik (Appel)	1967	Har bir qirra bo'ylab ko'rinmaslik sonini kuzatish	$O(n^2)$ tartibda	Chiziqli tasvirlar uchun tabiiy; egri sirtlarda qo'shimcha ishlov talab etadi [5]
Poligonlarni maydon bo'yicha saralash (Weiler–Ather-ton)	1977	Tasvirni rekursiv bo'lish va poligonlarni kesish	Kesishishlar soniga bog'liq	Kirish va chiqish formati bir xil; qayta ishlashga qulay [6]
Zamonaviy geometrik yadrolar	2015+	Klassik yechimlarning sanoat amalga oshirilishi	Amalda chiziqli-logarifmik	Tayyor interfeys; alohida dasturlash talab etilmaydi

2-jadval. Ko'rinmas chiziqlarni yo'qotish yondashuvlarining qiyosiy tavsifi [5; 6] asosida; oxirgi qator zamonaviy amaliyotni aks ettiradi.

Jadvaldan ko'rinadiki, klassik alqoritmlarning murakkabligi kirish primitivlari soniga nisbatan kvadratik tartibda shakllanadi. Bu o'quv topshiriqlari uchun cheklov hisoblanmaydi: talabaga beriladigan jism odatda 20–60 qirradan iborat bo'lib, bunday o'lchamlarda kvadratik algoritmlar ham real vaqt rejimida bajariladi. Demak, generativ modul uchun algoritmlar tanlashda tezlik emas, balki natijaning aniqligi va

akslantirish o'z-o'zicha triviiial bo'lib, asosiy hisoblash yuki ko'rinuvchanlikni aniqlashga to'g'ri keladi. Klassik alqoritmlarning qiyosiy tavsifi 2-jadvalda berilgan.

chiqish formatining vektor ko'rinishida bo'lishi hal qiluvchi mezon bo'ladi — bu jihatdan poligonlarni maydon bo'yicha saralashga asoslangan yondashuv ustunlikka ega, chunki uning chiqish formati kirish formati bilan bir xil bo'lib, keyingi qayta ishlash imkonini beradi [6]. Amalda bu funksiya alohida dasturlashni talab qilmaydi: zamonaviy geometrik yadrolar vektor chiqishli

proyeksiyalashni tayyor interfeys sifatida taqdim etadi.

Uchinchi natija (3) munosabatning qo'llanish chegarasiga tegishli. Eyler–Puankare formulasi hosil qilingan chegaraviy modelning topologik izchilligini tekshirishning arzon va samarali vositasi hisoblanadi. Biroq u zaruriy shart bo'lgani holda yetarli shart emas: munosabatni qanoatlantiruvchi, ammo geometrik jihatdan noto'g'ri (masalan, o'z-o'zini kesuvchi) model ham qurilishi mumkin. Shu sababli generativ modulda topologik tekshiruv geometrik tekshiruv — yoqlarning o'zaro kesishmasligi va qattiq jism shartining bajarilishi — bilan to'ldirilishi lozim.

To'rtinchi va metodologik jihatdan eng muhim natija teskari masalaga — uch ortogonal proyeksiyadan jismni tiklashga tegishli. Wesley va Markowskyning klassik ishlarida bu masalaning yechimi ko'pyoqlar sinfi uchun qurilgan [14; 15], keyinchalik u egri sirtli jismlarga kengaytirilgan; yo'nalishning umumiy holati alohida sharhda tizimlashtirilgan [16]. Barcha manbalar bir masalani qayd etadi: proyeksiyalar to'plami jismni bir qiymatli aniqlamaydi — bitta uch ko'rinishli chizmaga bir necha turli jism mos kelishi mumkin va bunday holatlarda algoritm bir nechta yechim hosil qiladi [16]. So'nggi yillarda bu masalaga ma'lumotlarga asoslangan yondashuvlar ham qo'llanilmoqda [9; 13], biroq ular ham bir qiymatlilikni kafolatlamaydi.

Ushbu holat topshiriq generatsiyasi uchun bevosita oqibatga ega. Agar talabaga «uch proyeksiya bo'yi-cha jismni tiklang» tipidagi topshiriq berilsa, generator hosil qilgan proyeksiyalar to'plamining bir qiymatliligini oldindan tekshirishi shart; aks holda talabaning formal jihatdan to'g'ri, ammo etalondan farq qiluvchi javobi noto'g'ri deb baholanadi. Bu esa baholash tizimining validligini buzadi. Shu sababli generativ modulda ikki mexanizmdan biri ko'zda tutilishi lozim: yo bir qiymatlilikni kafolatlovchi chekllovlar tizimi joriy etiladi, yo topshiriq ko'p yechimli sifatida rasmiylashtirilib, baholash mezonlari shunga moslashtiriladi.

Beshinchi natija — geometrik jihatdan asosli distraktorlar masalasi. 1-jadvalda ko'rsatilgan parametrik boshqaruv imkoniyati aynan shu vazifa uchun qo'l keladi: noto'g'ri javob variantlari tasodifiy tarzda emas, balki etalon jismning parametrlarini boshqariladigan tarzda o'zgartirish (qirra chuqurligini almashtirish, ko'rinmas chiziqni ko'rinishiga aylantirish, kesim yo'nalishini o'zgartirish) yo'li bilan sintez qilinadi. Bunday distraktorlar sinalluvchiga ularni fazoviy tahlilsiz chetlashtirish imkonini bermaydi va topshiriqning konstrukt validligini oshiradi.

Tahlil natijalari 3-jadvalda umumlashtirilgan.

Vazifa	Tanlangan yechim	Asoslash
Obyektni sintez qilish	CSG daraxti + parametrlar vektori	Parametrik boshqaruv va Bul amallarining tabiiyligi [1; 2]
To'g'rilikni ta'minlash	Regulyarlashtirilgan Bul amallari (2)	Natija doimo to'g'ri qattiq jism bo'lib qoladi [1]
Cheklovlarni boshqarish	Erkinlik darajalari balansi (4)	Ortiqcha va kam aniqlangan holatlarni oldini olish [3; 4]
Proyeksiyalarni qurish	B-rep ga o'tish + vektor chiqishli HLR algoritmi	Topologik axborot zarurligi; chiqish formatining qayta ishlanuvchanligi [2; 6]
Topologik tekshirish	Eyler–Puankare munosabati (3) + geometrik tekshiruv	Zaruriy, ammo yetarli bo'lmagan shart
Distraktorlarni sintez qilish	Parametrlarni boshqariladigan buzish	Chetlashtirish strategiyasining oldini olish
Bir qiymatlilikni nazorat qilish	Proyeksiyalar to'plamini oldindan tekshirish	Tiklash masalasining ko'p yechimlilik [14–16]

3-jadval. Generativ modul uchun tanlangan yechimlar va ularning asoslanishi (muallif tahlili natijasi).

Muhokama. Olingan natijalar mavjud adabiyotdagi ikki yo'nalishning — geometrik modellash va ta'lim tizimlarini avtomatlashtirish — kesishmasida joylashadi. Geometrik modellash sohasida tasvirlash sxemalari va proyeksiya algoritmlari yetarli darajada ishlab chiqilgan bo'lib, ular sanoat CAD tizimlarida o'nlab yillardan buyon qo'llanilmoqda. Ta'lim sohasida esa asosiy e'tibor teskari masalaga — talaba tomonidan bajarilgan chizmani avtomatik baholashga qaratilgan: so'nggi yillarda DXF fayllarni etalon bilan qiyoslash, geometrik belgilarni ajratib olish va qoidalarga asoslangan xato aniqlash tizimlari yaratilib, ular

ming donadan ortiq talaba ishida sinovdan o'tkazilgan [17; 18]. Kompyuter ko'rish usullariga tayanadigan muqobil yechimlar ham taklif etilgan [19].

Shu bilan birga, to'g'ri masala — topshiriqning o'zini geometrik jihatdan boshqariladigan tarzda sintez qilish — sezilarli darajada kam o'rganilgan. Mavjud ishlar asosan tayyor topshiriqlar bankidan foydalanadi, generatsiya esa amalda shablonlarni takrorlash bilan cheklanadi. Ushbu bo'shliq mazkur tadqiqot uchun asosiy yo'nalishni belgilaydi: parametrik generatsiyani nafaqat shakl xilma-xilligini, balki topshiriqning geometrik

murakkabligini ham boshqariladigan qilib qurish. Bunday boshqaruvning pedagogik ahamiyati fazoviy ko'nikmalarni maqsadli mashq orqali rivojlantirish samaradorligi bilan asoslanadi: CAD muhitidagi mashqlar va fazoviy vizualizatsiya ko'nikmalari o'rtasidagi bog'liqlik yaqinda o'tkazilgan empirik tadqiqotda tasdiqlangan [13].

Amalga oshirish nuqtayi nazaridan muhim jihat shundaki, sanoat CAD yadrolari (jumladan ochiq kodli geometrik yadrolar) CSG–B-rep o'tishini va vektor chiqishli proyeksiyalash imkoniyatini standart funksiya sifatida taqdim etadi. Bu holat generativ modulni noldan yozish zaruratini bartaraf etadi va tadqiqot diqqatini algoritmik yangilik joylashgan qismga — murakkablikni boshqarish va distraktorlarni sintez qilishga — qaratish imkonini beradi. Mahalliy tadqiqotlarda ham CAD vositalarini o'quv jarayoniga integratsiya qilish yo'nalishi rivojlanmoqda [20], biroq topshiriqni avtomatik sintez qilish masalasi ko'tarilmagan.

Tadqiqotning cheklovlarini qayd etish lozim. Birinchidan, 2-jadvaldagi murakkablik baholari asimptotik xarakterga ega bo'lib, real ishlash tezligi amalga oshirish tafsilotlariga va ma'lumotlar tuzilmasiga sezilarli bog'liq; shu bois ular tanlov uchun yagona mezon bo'la olmaydi. Ikkinchidan, tahlil ikki o'lchamli ortogonal proyeksiyalar bilan cheklandi — aksonometrik tasvirlar, kesimlar va qirqimlar alohida ko'rib chiqishni talab etadi. Uchinchidan, tiklash masalasining bir qiymatligini

tekshirish algoritmik jihatdan qimmat bo'lishi mumkin va uning generatsiya jarayoniga qanday integratsiya qilinishi alohida tadqiqot mavzusidir. To'rtinchidan, maqolada keltirilgan qiyosiy baholar adabiyot tahliliga asoslangan bo'lib, ular hisoblash tajribasi bilan tasdiqlanishi lozim.

Xulosa. Maqolada fazoviy geometrik obyektlarni parametrik modelashtirish va ularning ortogonal proyeksiyalarini hosil qilish usullari grafik topshiriqlarni avtomatik generatsiya qilish vazifasi nuqtayi nazaridan qiyosiy tahlil qilindi.

Tahlil quyidagi xulosalarga olib keldi. Birinchidan, tasvirlash sxemalarining hech biri belgilangan beshta mezonning barchasi bo'yicha ustun emas, shu sababli generativ modul uchun CSG va B-rep tasvirlarining gibrad qo'llanilishi asoslangan: parametrik sintez CSG darajasida, proyeksiyalash esa chegaraviy model darajasida amalga oshiriladi. Ikkinchidan, proyeksiya qurishning hisoblash yadrosi ko'rinmas chiziqlarni aniqlashdan iborat bo'lib, klassik algoritmning kvadratik murakkabligi o'quv topshiriqlari o'lchamlarida cheklov hisoblanmaydi; tanlovda hal qiluvchi mezon chiqish formatining vektor ko'rinishida bo'lishidir.

Uchinchidan, Eyler–Puankare munosabati topologik izchillikni tekshirishning zaruriy, ammo yetarli bo'lmagan sharti hisoblanadi va u geometrik tekshiruv bilan to'ldirilishi lozim. To'rtinchidan, uch ortogonal

proyeksiyadan jismni tiklash masalasining ko'p yechimliligi generatsiya qilinadigan topshiriqlar uchun bevosita metodologik oqibatga ega: proyeksiyalar to'plamining bir qiymatliligi oldindan tekshirilmasa, baholash tizimining validligi buziladi.

Olingan natijalar generativ modul arxitekturasini uchun asoslangan tanlov qilish imkonini beradi. Keyingi tadqiqotda parametrik sintez algoritmini ishlab chiqish, topshiriqning geometrik murakkablik metrikasini shakllantirish hamda tanlangan yechimlarni hisoblash tajribasi orqali tekshirish vazifalari belgilanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

- [1] Requicha A.A.G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems // ACM Computing Surveys. — 1980. — Vol. 12, №4. — P. 437–464. DOI: 10.1145/356827.356833. (Tasvirlash sxemalari nazariyasining birlamchi manbasi).
- [2] Requicha A.A.G., Voelcker H.B. Boolean Operations in Solid Modeling: Boundary Evaluation and Merging Algorithms // Proceedings of the IEEE. — 1985. — Vol. 73, №1. — P. 30–44. DOI: 10.1109/PROC.1985.13108.
- [3] Bettig B., Hoffmann C.M. Geometric Constraint Solving in Parametric Computer-Aided Design // Journal of Computing and Information Science in Engineering. — 2011. — Vol. 11, №2. — Art. 021001. DOI: 10.1115/1.3593408.
- [4] Zou Q. et al. A Review on Geometric Constraint Solving. — arXiv:2202.13795, 2022.
- [5] Appel A. The Notion of Quantitative Invisibility and the Machine Rendering of Solids // Proceedings of the 22nd ACM National Conference. — 1967. — P. 387–393. DOI: 10.1145/800196.806007. (Ko'rinmaslikni aniqlash tushunchasining birlamchi manbasi).
- [6] Weiler K., Atherton P. Hidden Surface Removal Using Polygon Area Sorting // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. — 1977. — Vol. 11, №2. — P. 214–222. DOI: 10.1145/965141.563896.
- [7] Koch S., Matveev A., Jiang Z., Williams F., Artemov A., Burnaev E., Alexa M., Zorin D., Panozzo D. ABC: A Big CAD Model Dataset for Geometric Deep Learning // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2019. — P. 9601–9611. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00983.
- [8] Willis K.D.D., Pu Y., Luo J., Chu H., Du T., Lambourne J.G., Solar-Lezama A., Matusik W. Fusion 360 Gallery: A Dataset and Environment for Programmatic CAD Construction from Human Design Sequences // ACM Transactions on Graphics. — 2021. — Vol. 40, №4. — P. 1–24.

- [9] Wu R., Xiao C., Zheng C. DeepCAD: A Deep Generative Network for Computer-Aided Design Models // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). — 2021. — P. 6772–6782.
- [10] Xu X., Jayaraman P.K., Lambourne J.G., Willis K.D.D., Furukawa Y. Hierarchical Neural Coding for Controllable CAD Model Generation // Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML). — 2023.
- [11] Lambourne J.G., Willis K.D.D., Jayaraman P.K., Sanghi A., Meltzer P., Shayani H. BRepNet: A Topological Message Passing System for Solid Models // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2021. — P. 12773–12782.
- [12] Li C., Pan H., Bousseau A., Mitra N.J. Free2CAD: Parsing Freehand Drawings into CAD Commands // ACM Transactions on Graphics. — 2022. — Vol. 41, №4. — P. 1–16. DOI: 10.1145/3528223.3530133.
- [13] Nguyen et al. No Student Left Behind in Engineering Education: An Empirical Study on AutoCAD-Based Spatial Learning and Its Associations with Visualization Skills // Computer Applications in Engineering Education. — 2026. DOI: 10.1002/cae.70157.
- [14] Wesley M.A., Markowsky G. Fleshing Out Wire Frames // IBM Journal of Research and Development. — 1980. — Vol. 24, №5. — P. 582–597. (Tiklash masalasining birlamchi manbasi).
- [15] Wesley M.A., Markowsky G. Fleshing Out Projections // IBM Journal of Research and Development. — 1981. — Vol. 25, №6. — P. 934–954.
- [16] Fahiem M.A., Haq S.A., Saleemi F. A Review of 3D Reconstruction Techniques from 2D Orthographic Line Drawings // Geometric Modeling and Imaging (GMAI '07). — IEEE, 2007. — P. 60–66.
- [17] Xiao et al. CAD-AG: A Webapp for CAD-Tool-Independent Autograding of Two-Dimensional CAD Drawings // Computer Applications in Engineering Education. — 2026. DOI: 10.1002/cae.70149.
- [18] Wang L.J., Lim S.Y., Lin K.O., Tan C.K., Tan R.Y.S., Sani S.B., Tan H.J.A. Artificial Intelligence-Enabled Evaluating for Computer-Aided Drawings (AMCAD) // International Journal of Mechanical Engineering Education. — 2024. DOI: 10.1177/03064190231175231.
- [19] Goh K.N. et al. Automatic Assessment for Engineering Drawing // Advances in Visual Informatics. — Cham: Springer, 2013. — P. 497–507. DOI: 10.1007/978-3-319-02958-0_45.
- [20] Achilov N.N. Kompyuter grafikasi vositasida talabalarni ijodiy qobiliyatlarini rivojlantirish: pedagogika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati: 13.00.02. — Toshkent: Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, 2025.

- [21] Xujaev, M. (2020). Mahmudkhuja Behbudiy as a leader of jadid reforms. The Light of Islam, 3, 39-47.
- [22] Evlen, H., Juraev, D., Ziyamukhamedova, U., Khujaev, M., & Jalilov, F. (2025). PLA/Ti6Al4V composite scaffolds for bone tissue engineering: mechanical and thermal properties via FDM and bioprinting. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 1-25.
- [23] Abduraimova, N., Sharopova, N., Khujaev, M., Sapayev, V., Fattoyeva, O., & Yusufov, S. (2025). Economic development through analysis of the education and entrepreneurship impacts. Economic Annals-XXI/Ekonomičnij Časopis-XXI, 214(3/4), 84.
- [24] Isoxonovich, M. X. (2022). Middle Ages Movarounnahr Rulers in the Views OF Researchers. European Journal of Innovation in Nonformal Education, 2(6), 134-136.
- [25] Xujayev, M. I. (2018). THE COVERAGE OF THE PROBLEM OF NATIONALITY AND ITS ROLE ON THE PRESENT DAY IN AHMAD ZAKI VALADI'S WORK. Мировая наука, (6 (15)), 61-63.
- [26] Хужаев, М. И. (2018). АХМАД ЗАКИ ВАЛИДИЙНИНГ ДИНИЙ-ФАЛСАФИЙ МЕРОСИНИНГ ИЛДИЗЛАРИ. In Инновационные подходы в современной науке (pp. 177-182).
- [27] Khujaev, M. (2024). AHMED ZAKI: ON THE IDEAS OF THE PHILOSOPHY OF HISTORY. Экономика и социум, (1 (116)), 235-239.