“MAGNIT YARIMO‘TKAZGICHLAR VA SPINTRONIKA” FANIDA MURAKKAB MAVZULARNI HAYOTIY ANALOGIYALAR ASOSIDA O‘QITISH METODIKASI

Sharipova Ra’no Shavkatovna,
O‘zbekiston Milliy universiteti Nanotexnologiyalarni rivojlantirish markazi tayanch doktoranti
ranosharipova9397@gmail.com

Maqolada “Magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika” fanining murakkab kvant-mexanik mavzularini o‘qitishning uslubiy tomonlari yoritilgan. Bunda hayotiy analogiyalar yondashuvi asosida o‘qitish tavsiya etilgan bo‘lib, unda Gentner tuzilma-moslashtirish nazariyasi, Sweller kognitiv yuklanish nazariyasi va Ausubel mazmunli o‘qitish tamoyilidan kelib chiqqan holda talabalarning spin, almashinuv integrali, GMR va TMR effektlari kabi tushunchalarni o‘zlashtirish masalasi muhokama qilingan. Unda keltirilgan ma’lumotlar bo‘lajak mutaxassislarning fanni chuqur anglashi va analogik fikrlash ko‘nikmasini shakllantirishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: *hayotiy analogiya, kognitiv yuklanish, tuzilma-moslashtirish nazariyasi, spintronika, magnit yarimo‘tkazgichlar, mazmunli o‘qitish, bilimni ko‘chirish, ishchi xotira, pedagog, bo‘lajak o‘qituvchi.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОБУЧЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕМАМ ДИСЦИПЛИНЫ «МАГНИТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И СПИНТРОНИКА» НА ОСНОВЕ ЖИЗНЕННЫХ АНАЛОГИЙ

В статье освещены методические аспекты обучения сложным квантово-механическим темам дисциплины «Магнитные полупроводники и спинтроника». Было рекомендовано обучение на основе подхода жизненных аналогий, в котором на основе теории структурного отображения Гентнера, теории когнитивной нагрузки Свеллера и принципа осмысленного обучения Аусубеля обсуждался вопрос усвоения студентами таких понятий, как спин, обменный интеграл, эффекты GMR и TMR. Представленная в ней информация служит глубокому пониманию дисциплины будущими специалистами и формированию у них навыков аналогического мышления.

Ключевые слова: *жизненная аналогия, когнитивная нагрузка, теория структурного отображения, спинтроника, магнитные полупроводники, осмысленное обучение, перенос знаний, рабочая память, педагог, будущий учитель.*

IMPROVING THE METHODOLOGY FOR TEACHING COMPLEX TOPICS IN THE “MAGNETIC SEMICONDUCTORS AND SPINTRONICS” COURSE THROUGH REAL-LIFE ANALOGIES

Methodological aspects of teaching complex quantum-mechanical topics of the discipline “Magnetic Semiconductors and Spintronics” are covered in the article. It was recommended to teach on the basis of the real-life analogy approach, in which, based on Gentner‘s structure-mapping theory, Sweller‘s cognitive load theory, and Ausubel‘s principle of meaningful learning, the issue of students mastering concepts such as spin, exchange integral, and GMR/TMR effects was discussed. The information presented in it serves to deepen future specialists‘ understanding of the discipline and to form their analogical thinking skills.

Keywords: *real-life analogy, cognitive load, structure-mapping theory, spintronics, magnetic semiconductors, meaningful learning, knowledge transfer, working memory, teacher, future teacher.*

Kirish. “Magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika” oliy ta’lim fanlari tizimida eng murakkab fanlardan biri hisoblanadi, chunki u kvant mexanikasi, qattiq jism fizikasi va magnit hodisalar nazariyasini o‘z ichiga birlashtiradi. Fanning markazidagi tushunchalar — spin momenti, almashinuv integrali, magnit faza o‘tishi, GMR va TMR effektlari — bevosita sezgi organlari orqali kuzatilmaydi, faqat matematik formalizm orqali ifodalanadi. Shu sababli talabalar bu tushunchalarni o‘zlashtirishda jiddiy qiyinchiliklarga duch keladi, bu esa muammoni ta’lim jarayonining markaziy masalalaridan biriga aylantiradi.

Muammoning dolzarbligi ikki omil bilan izohlanadi. Birinchidan, fan kvant darajadagi hodisalarni o‘z ichiga olganligi sababli, talabalardan yuqori darajada abstrakt va tizimli fikrlashni talab etadi. Ikkinchidan, mavzular orasidagi element interaktivligi yuqori bo‘lib, bir vaqtning o‘zida bir necha o‘zaro bog‘liq g‘oyani

(masalan, spin-orbital o‘zaro ta’sir, kristall nosimmetriya va to‘qnashuv jarayonlari) qayta ishlashni taqozo etadi. Natijada talabaning ishchi xotirasiga ortiqcha yuklanma tushadi, bu esa tushunishni sezilarli darajada qiyinlashtiradi.

Ushbu muammoning yechimi sifatida hayotiy analogiyalardan foydalanish yondashuvi taklif etiladi: analogiya orqali abstrakt tushuncha talabaning mavjud kundalik tajribasi bilan bog‘lanadi va begona kognitiv yuklanish kamayadi. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, mahalliy uslubiy adabiyotlarda spintronika fanini o‘qitishda tuzilma-moslashtirish nazariyasiga asoslangan tizimli analogiyalar majmuasi hozirgacha ishlab chiqilmagan.

Tadqiqotning maqsadi — fanning murakkab nazariy mavzularini o‘qitishda qo‘llaniladigan hayotiy analogiyalar tizimini ilmiy asoslangan tarzda ishlab chiqish, tasniflash va pedagogik samaradorligini izohlashdan iborat. Tadqiqotning vazifalari quyidagilardan iborat: 1) analogik fikrlashning kognitiv mexanizmini izohlovchi nazariy asoslarni tahlil qilish; 2) fan mavzulari uchun hayotiy analogiyalar tizimini ishlab chiqish va ularni tuzilmaviy, funksional va jarayonli turlarga tasniflash; 3) ishlab chiqilgan analogiyalar tizimining kuchli va zaif tomonlarini, shuningdek qo‘llash chegaralarini aniqlash.

Tadqiqot obyekti va qo‘llanilgan metodlar. Tadqiqot obyekti sifatida “Magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika” fanining 10 asosiy mavzusi va ularda uchraydigan abstrakt, bevosita kuzatilmaydigan kvant-mexanik tushunchalar tanlandi. Tadqiqot metodi sifatida sifat (qualitative) tadqiqot doirasidagi kontent-tahlil va pedagogik dizayn asosidagi tadqiqot (design-based research) yondashuvi qo‘llanildi. Tadqiqot yo‘nalishi induktiv xarakterga ega: dastlab fanning 10 mavzusi bo‘yicha o‘quv dasturi va tayanch adabiyotlar tahlil qilinib, har bir mavzudagi abstrakt, bevosita kuzatilmaydigan tushunchalar aniqlandi.

Tanlash (sampling) mezoni sifatida ikki shart qo‘yildi: 1) tushunchaning kvant-mexanik yoki abstrakt tabiatga ega bo‘lishi; 2) uni talabaning kundalik tajribasidagi hodisa bilan tuzilmaviy jihatdan moslashtirish imkoniyatining mavjudligi. Har bir analogiya uchta bosqichli mezon orqali baholandi: “qaysi tuzilmaviy munosabat mos keladi?” (Gentner [12] mezoni), “talabaning mavjud qaysi bilimiga bog‘lanadi?” (Ausubel [13] mezoni) va “analogiyaning chegarasi qayerda?” (Gentner [12] boundary conditions mezoni). Ma’lumotlar ikkilamchi manbalar — nazariy-pedagogik adabiyotlar va fanning o‘quv-uslubiy materiallari — asosida yig‘ildi hamda tavsifiy-qiyosiy tahlil usuli bilan qayta ishlandi: har bir analogiya uning tuzilmaviy mosligi, pedagogik roli va qo‘llanish chegarasi bo‘yicha tavsiflanib, jadval ko‘rinishida tizimlashtirildi.

Tanlangan yo‘lning ishonchliligi (reliability) uchta mustaqil nazariy mezon (Gentner, Sweller, Ausubel) orqali o‘zaro tekshirilishi bilan, aniqliligi (validity) esa har bir analogiyaning fanning aniq mavzusi va tushunchasiga to‘g‘ridan to‘g‘ri bog‘lanishi bilan ta’minlandi.

Mavzuga doir adabiyotlarning tahlili. Analogik fikrlashning kognitiv mexanizmini Gentner [12] ishlab chiqqan tuzilma-moslashtirish nazariyasi (Structure-Mapping Theory) izohlaydi: analogiya jarayonida miya ikkita soha o‘rtasidagi obyektlarni emas, balki ular orasidagi tuzilmaviy munosabatlarni moslashtiradi. Tanish soha “manba domini” (source domain), o‘rganilayotgan yangi soha esa “maqsad domini” (target domain) deb ataladi. Gentner [12] analogiyalarni yuzaki o‘xshashlik, munosabat o‘xshashligi va tizim o‘xshashligi bo‘yicha uch darajaga ajratadi, bu tasnif pedagogik amaliyotda analogiyalarni baholash mezoni sifatida keng qo‘llaniladi.

Sweller [5] kognitiv yuklanish nazariyasiga (Cognitive Load Theory) ko‘ra, o‘qitish jarayonida axborotning ishchi xotiraga tushadigan yuklanmasi uch turga ajraladi: ichki (intrinsic), begona (extraneous) va samarali (germane) yuklanma. Nazariyaga ko‘ra, o‘qituvchining vazifasi begona yuklanmani kamaytirib, samarali yuklanmani oshirishdan iborat — analogiyalar aynan shu vazifani bajaradi. Ausubel [13] mazmunli o‘qitish nazariyasi (Meaningful Learning Theory) bo‘yicha yangi bilim faqat talabaning mavjud kognitiv sxemalari bilan bog‘langandagina chuqur va barqaror o‘zlashtiriladi.

Mayer [1] ning ikki kanalli (multimedia) nazariyasiga ko‘ra, analogik tasvir vizual kanal orqali, izohlovchi matn esa verbal kanal orqali bir vaqtda qayta ishlanadi, bu esa ikki kanalli kodlash orqali eslab qolishni mustahkamlaydi. Vygotsky [6] ning yaqin rivojlanish zonasi kontseptsiyasi analogiyaning talabani tanish domendan notanish domenga ko‘tarishdagi “ko‘prik” vazifasini nazariy jihatdan asoslaydi, Piaget [4] esa talabaning bilimni tayyor holda emas, balki faol ravishda o‘z kognitiv tarmog‘iga qurish jarayonini (assimilyatsiya va akkomodatsiya) ta’kidlaydi.

Faol o‘qitish samaradorligini tasdiqlovchi empirik tadqiqotlar ham tahlil qilindi. Freeman va boshqalar [10] STEM yo‘nalishlarida faol o‘qitish usullarining an‘anaviy ma’ruzaga nisbatan talabalar natijadorligini sezilarli darajada oshirishini ko‘rsatgan. Hake [2] o‘zining keng ko‘lamli tadqiqotida interaktiv-jalb qiluvchi metodlarning an‘anaviy metodlarga nisbatan afzalligini statistik jihatdan asoslagan. Formativ baholash sohasida Black va Wiliam [9] hamda Nicol va Macfarlane-Dick [11] talabaning o‘z bilimini nazorat qilish (self-regulated learning) jarayonida sifatli teskari aloqaning muhim rolini ko‘rsatgan. Roediger va Karpicke [7] faol esga tushirish (retrieval practice) uzoq muddatli xotirada saqlanishni yaxshilashini, Hattie [8] esa o‘z

meta-tahlilida real vaqtdagi qayta aloqaning o‘quv natijalariga ta’sirini eng yuqori samaradorlik ko‘rsatkichlaridan biri sifatida baholagan. Nihoyat, Awschalom va Flatté [3] spintronika sohasidagi fundamental nazariy muammolarni yoritib, elektron spinining sof kvant obyekti ekanini va uni klassik fizika doirasida to‘liq ifodalab bo‘lmasligini ta’kidlagan — bu holat spintronikani o‘qitishda analogik yondashuvning nafaqat foydali, balki ehtiyotkorlik bilan qo‘llanilishi zarur bo‘lgan vosita ekanini ko‘rsatadi.

Muhokama. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, kognitiv yuklanish nazariyasi, tuzilma-moslashtirish nazariyasi va mazmunli o‘qitish tamoyili birgalikda hayotiy analogiyalardan foydalanishning nazariy asosini tashkil etadi, biroq bu nazariyalarning aynan magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika fani doirasida amaliy qo‘llanilishi bo‘yicha mahalliy adabiyotlarda yetarli darajada tadqiqot olib borilmagan. Shu bo‘shliqni to‘ldirish maqsadida mazkur tadqiqotda 14 ta analogiya ishlab chiqilib, ularning nazariy asoslanganligi uch mustaqil mezon (Gentner, Sweller, Ausubel) orqali o‘zaro tekshirildi, bu esa natijalarning ishonchliligini (reliability) ta’minlaydi.

Shu bilan birga, tadqiqot natijalari analogiyaning cheklangan xarakterga ega ekanini ham ko‘rsatadi: Awschalom va Flatté [3] ta’kidlaganidek, elektron spinining o‘zi sof kvant obyekti bo‘lib, uni klassik fizika doirasida to‘liq ifodalab bo‘lmaydi, shuning uchun barcha analogiyalar muqarrar ravishda faqat qisman to‘g‘ri bo‘lib qoladi va ularning qo‘llanish chegarasi doimo talabaga aniq ko‘rsatilishi lozim. Bundan tashqari, har qanday analogiya ma’lum bir madaniy va hayotiy tajribaga tayanadi: “kompas” yoki “issiq choy” kabi o‘xshatmalar O‘zbekiston talabasi uchun tanish bo‘lsa-da, boshqa madaniy muhitda ular xuddi shunday ta’sir ko‘rsatmasligi mumkin, bu esa Ausubel [13] ta’kidlagan “tegishli bilish sxemasi mavjudligi” shartini metodik jihatdan alohida hisobga olishni talab qiladi.

Olingan natijalar va ularning tahlili. Tadqiqot natijasida 14 ta hayotiy analogiya ishlab chiqildi va Gentner [12] tuzilma-moslashtirish nazariyasiga muvofiq uch turga tasniflandi: tuzilmaviy, funksional va jarayonli analogiyalar. Gentner [12] tomonidan taklif etilgan uch darajali tasnif (yuzaki o‘xshashlik, munosabat o‘xshashligi, tizim o‘xshashligi) mazkur metodikada qo‘llanilgan barcha analogiyalarni baholash mezonini belgiladi (1-jadval).

1-jadval.

Gentner tuzilma-moslashtirish nazariyasiga ko‘ra analogiyalar tasnifi

Daraja	Ta’rifi	Pedagogik roli	Spintronikadan misol
1. Yuzaki o‘xshashlik	Tashqi ko‘rinish o‘xshashligi; sayoz moslik	Dastlabki tasvir yaratish	“Elektron aylanadi” — dastlabki vizual tasvir
2. Munosabat o‘xshashligi	Tuzilmaviy mantiq o‘xshashligi	Chuqur tushunish	Spin relaksatsiyasi ↔ Issiq choyning sovishi
3. Tizim o‘xshashligi	Ko‘p darajali munosabatlar tizimi	Transfer ko‘nikmasi	GMR ↔ Ikkita eshik modeli

Tuzilmaviy analogiyalar fizik obyekt yoki tizimning fazoviy tuzilishiga, funksional analogiyalar uning ishlash tartibiga, jarayonli analogiyalar esa hodisaning bosqichma-bosqich dinamikasiga tayanadi. Fanning barcha 10 mavzusi uchun ishlab chiqilgan 14 ta analogiyaning to‘liq ro‘yxati 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval.

“Magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika” fanida qo‘llaniladigan analogiyalar tasnifi

Turi	Hayotiy analogiya	Fizik tushuncha	Mavzu
Tuzilmaviy	Kitob (ko‘p qavat) va bitta varaq	3D va 2D magnit yarimo‘tkazgichlar	8
Tuzilmaviy	Qavatli bino	Kvant energiya sathlari	1–10
Tuzilmaviy	Havoda aylanayotgan tanga	Qubit: superpozitsiya holati	10
Tuzilmaviy	Kompas ignasi	Magnit anizotropiya	4
Funksional	Ikki dastalik kran	Spin tranzistor	7
Funksional	Ketma-ket ikkita polaroid filtr	GMR effekti	6
Funksional	Pochta tashuvchi	Zener p–d almashinuvi	3
Funksional	Rangli suv tiniq suvga quyilishi	Spin injeksiyasi	3, 7
Funksional	Polaroid ko‘zoynak linzasini burish	Faradey effekti	5

Turi	Hayotiy analogiya	Fizik tushuncha	Mavzu
Jarayonli	Muz erishi	Magnit faza o‘tishi	2
Jarayonli	Issiq choyning sovishi	Spin relaksatsiyasi (T_1 , T_2)	2, 6
Jarayonli	Harorat farqidan hosil bo‘lgan shamol	Spin Seebek effekti	9
Jarayonli	Giroskop	Spin pretsessiyasi	4, 5
Jarayonli	Hid tarqalishi	Spin diffuziyasi	3, 6

Masalan, spin relaksatsiyasini tushuntiruvchi “issiq choyning sovishi” analogiyasida tashqi ta’sir (magnit maydon) yo‘qolgandan so‘ng spinlarning asta-sekin muvozanat holatiga — tasodifiy tartibga — qaytish jarayoni issiq choyning atrof-muhit harorati bilan muvozanatga kelish jarayoniga tuzilmaviy jihatdan mos keladi: “tartiblanish → tashqi ta’sirning yo‘qolishi → muvozanatga qaytish” ketma-ketligi ikkala domenda ham bir xil mantiqda ishlaydi; bu Gentner [12] nazariyasidagi tizim o‘xshashligining yaqqol namunasidir. Xuddi shunday, GMR effektini tushuntiruvchi “ketma-ket ikkita polaroid filtr” analogiyasida spin-valve qurilmasidagi ikkita ferromagnit qatlamning parallel yoki antiparallel yo‘nalishi filtrlarning o‘zaro yo‘nalishi bilan funksional jihatdan moslashtiriladi: yo‘nalishlar bir xil bo‘lganda elektronlar (yorug‘lik) oson o‘tadi, qarama-qarshi bo‘lganda esa o‘tish qiyinlashadi.

Kvant kompyuter va spin qubitlar mavzusida ikkita analogiya ketma-ket qo‘llaniladi: “havoda aylanayotgan tanga” qubitning superpozitsiya holatini tushuntiradi. Piaget [4] tasvirlagan akkomodatsiya jarayonida talaba tanish bo‘lgan tanga sxemasini qayta quradi — endi tanga “bir vaqtda ikki holatda” bo‘la oladi, bu talabada aqliy ziddiyat (dissonans) tug‘diradi va aynan shu ziddiyat yangi kognitiv sxemaning shakllanishiga turtki bo‘ladi. Shu bilan birga, har bir analogiyaning “chegarasi” (boundary conditions) alohida ko‘rsatilishi zarur: haqiqiy tangada kvant interferensiya va dekoherensiya mavjud emas — analogiya faqat superpozitsiya g‘oyasini beradi, undan nariga o‘tmaydi.

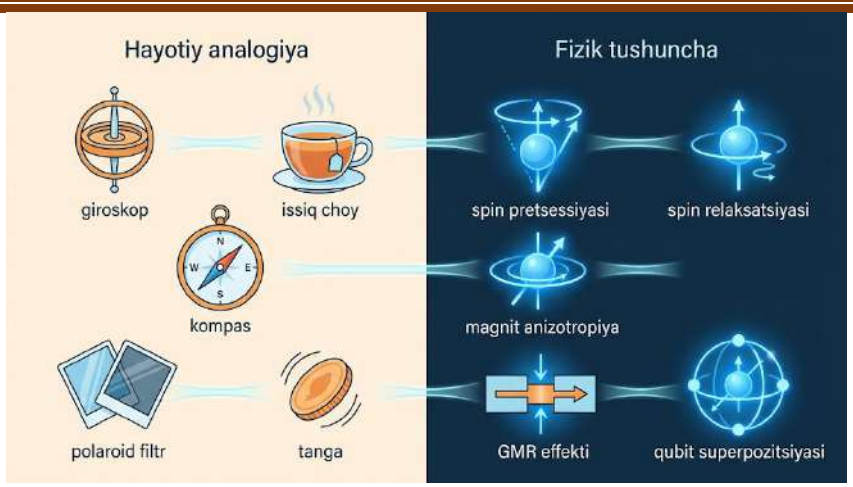
Analogiya yondashuvining kuchli va zaif tomonlari alohida tahlil qilindi (3-jadval).

3-jadval.

Analogiya yondashuvining kuchli va zaif tomonlari

Jihat	Kuchli tomonlar	Zaif tomonlar va cheklovlar
Aqliy ta’sir	Kognitiv yuklanishni kamaytiradi [5]	Noto‘g‘ri sxema shakllanishi mumkin — over-extension [12]
O‘zlashtirishga ta’siri	Mavjud bilim bilan ko‘prik yaratadi [13]	Ortiqcha tayanish matematik formalizmga o‘tishni qiyinlashtiradi [5]
Transfer	Bilimni yangi vaziyatlarga ko‘chirish ko‘nikmasini rivojlantiradi [6]	Transfer faqat tuzilmaviy moslik kuchli bo‘lgandagina samarali [12]
Ikki kanalli ta’sir	Vizual va verbal kanallarni bir vaqtda faollashtiradi [1]	Vizual analogiya ba’zan fizik reallikdan chalg‘itishi mumkin
Madaniy universallik	O‘zbekiston kontekstiga moslashtirilgan, tanish	Har bir analogiya muayyan hayotiy tajribaga tayanadi [13]

Kuchli tomonlar orasida kognitiv yuklanishning kamayishi [5], mavjud bilim bilan ko‘prik yaratish [13], uzoq muddatli eslab qolishning oshishi [6], ikki kanalli qabul qilishning ta’minlanishi [1] va o‘quv motivatsiyasining oshishi ajralib turadi. Zaif tomonlar orasida esa noto‘g‘ri tushunchalarning shakllanish xavfi (over-extension) [12], analogiyaga ortiqcha tayanish natijasida matematik formalizmga o‘tishning qiyinlashishi [5] va analogiyalarning madaniy universallik muammosi [13] alohida ta’kidlanadi. Shu sababli har bir analogiyadan foydalangandan so‘ng uning qo‘llanish chegarasini talabaga aniq ko‘rsatish metodik jihatdan zarur.



1-rasm. Hayotiy analogiya va fizik tushuncha o‘rtasidagi bog‘lanish sxemasi muallif tomonidan sun‘iy intellekt yordamida yaratilgan)

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqot natijasida “Magnit yarimo‘tkazgichlar va spintronika” fanini o‘qitishda hayotiy analogiyalardan foydalanish metodikasining nazariy va amaliy asoslari ishlab chiqildi. Tadqiqot maqsadi va vazifalari to‘liq amalga oshirildi: Gentner [12], Sweller [5] va Ausubel [13] nazariyalari asosida 14 ta hayotiy analogiya tuzilmaviy, funksional va jarayonli turlarga tasniflanib, fanning 10 mavzusiga bog‘landi; har bir analogiya uchun uning chegarasini ko‘rsatish qoidasi joriy etilib, talabalarda noto‘g‘ri tushunchalar shakllanishining oldi olindi.

Tadqiqot natijalariga ko‘ra quyidagi xulosalarga kelindi: birinchidan, tuzilma-moslashtirish nazariyasi asosida tanlangan analogiyalar abstrakt kvant-mexanik tushunchalarni talabaning mavjud kognitiv sxemalariga bog‘lash orqali begona kognitiv yuklanishni kamaytiradi; ikkinchidan, tuzilmaviy, funksional va jarayonli analogiyalar turlicha bilish vazifasini bajaradi, shu sababli ularni fanning tabiatiga mos ravishda tanlab qo‘llash metodik jihatdan zarur; uchinchidan, har bir analogiyaning pedagogik samaradorligi uning chegarasini talabaga aniq ko‘rsatishga bevosita bog‘liq.

Amaliy tavsiya sifatida quyidagilar taklif etiladi: 1) analogiyalar tizimini o‘quv-uslubiy majmualarga majburiy uslubiy vosita sifatida kiritish; 2) har bir analogiya taqdim etilgandan so‘ng uning qo‘llanish chegarasini talabaga alohida tushuntirish tartibini joriy etish; 3) analogiyalarni vizual (slayd, sxema) va verbal (matn) kanallar orqali bir vaqtda taqdim etish, bu Mayer [1] ning ikki kanalli o‘zlashtirish tamoyiliga mos keladi; 4) analogik metodikaning o‘quv natijalariga ta’sirini miqdoriy baholash (pedagogik eksperiment, oldin-keyin testlash) bo‘yicha keyingi tadqiqotlarni davom ettirish. Ushbu yo‘nalish kelgusi tadqiqotlarning asosiy vazifasi sifatida belgilanadi.

Adabiyotlar:

1. Mayer R.E. Multimedia Learning. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

2. Hake R.R. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses // American Journal of Physics. – 1998. – Vol. 66, No. 1. – P. 64–74.

3. Awschalom D.D., Flatté M.E. Challenges for semiconductor spintronics // Nature Physics. – 2007. – Vol. 3. – P. 153–159.

4. Piaget J. Psychology and Pedagogy. – New York: Viking Press, 1970.

5. Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning // Cognitive Science. – 1988. – Vol. 12, No. 2. – P. 257–285.

6. Vygotsky L.S. Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. – Cambridge: Harvard University Press, 1978.

7. Roediger H.L., Karpicke J.D. Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention // Psychological Science. – 2006. – Vol. 17, No. 3. – P. 249–255.

8. Hattie J. Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. – London: Routledge, 2009.

9. Black P., Wiliam D. Assessment and classroom learning // Assessment in Education: Principles, Policy & Practice. – 1998. – Vol. 5, No. 1. – P. 7–74.

10. Freeman S., Eddy S.L., McDonough M., Smith M.K., Okoroafor N., Jordt H., Wenderoth M.P. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111, No. 23. – P. 8410–8415.

11. Nicol D.J., Macfarlane-Dick D. Formative assessment and self-regulated learning: A model and seven principles of good feedback practice // Studies in Higher Education. – 2006. – Vol. 31, No. 2. – P. 199–218.

12. Gentner D. Structure-mapping: A theoretical framework for analogy // Cognitive Science. – 1983. – Vol. 7, No. 2. – P. 155–170.

13. Ausubel D.P. Educational Psychology: A Cognitive View. – New York: Holt, Rinehart & Winston, 1968.