UO‘K 378.147:530.145:004

KVANT MEXANIKASIDA STATSIONAR TO‘LQIN FUNKSIYANI RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR YORDAMIDA O‘QITISHNING PEDAGOGIK ASOSLARI

E.K.Muxtarov

Maqolada kvant mexanikasining asosiy tushunchalaridan biri – to‘lqin funksiyasi $\Psi(x,t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t}$ *ni o‘qitishning pedagogik va raqamli metodikasi yoritilgan. Unda to‘lqin funksiyasining fizik ma’nosi, ehtimollik zichligi bilan bog‘liqligi, amplituda va fazaning fazoviy-vaqtinchalik o‘zgarishlari tahlil qilingan. Raqamli texnologiyalar yordamida ushbu murakkab mavzuni o‘qitish samaradorligini oshirish yo‘llari ko‘rsatib berilgan. Pedagogik nuqtayi nazardan, talabalarning abstrakt tushunchalarni intuitiv qabul qilishi uchun bosqichma-bosqich modellashtirish, virtual tajribalar va avtomatik tahlil elementlari qo‘llanilishi taklif etildi. Mazkur metodika nafaqat kvant to‘lqin funksiyasini tushunishni yengillashtiradi, balki talabada ilmiy tafakkurni, mantiqiy tahlilni va ijodiy fikrlashni rivojlantiradi*.

Kalit so‘zlar: *kvant mexanikasi, to‘lqin funksiyasi, raqamli o‘qitish, vizualizatsiya, o‘qitish metodikasi, virtual muhit, ehtimollik zichligi*.

В статье раскрыта педагогическая и цифровая методика преподавания одной из ключевых концепций квантовой механики - волновой функции $\Psi(x,t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t}$*. Глубоко анализируются физический смысл волновой функции, её связь с плотностью вероятности, а также пространственно-временные изменения амплитуды и фазы. Показаны способы повышения эффективности обучения этой сложной теме с помощью цифровых технологий. С педагогической точки зрения предлагаются поэтапное моделирование, виртуальные эксперименты и элементы автоматического анализа для интуитивного восприятия абстрактных понятий студентами. Предлагаемая методика не только упрощает понимание квантовой волновой функции, но и развивает у обучающихся научное мышление, логический анализ и творческое мышление.*

Ключевые слова: *квантовая механика, волновая функция, цифровое обучение, визуализация, методика преподавания, виртуальная среда, плотность вероятности*.

Kirish

Zamonaviy oliy ta’limda kvant mexanikasining abstrakt tushunchalarini samarali o‘zlashtirish masalasi dolzarb bo‘lib qolmoqda. Ayniqsa, statsionar to‘lqin funksiyasi, uning fizik mazmuni, ehtimollik zichligi bilan aloqasi, amplituda va fazaning fazo-vaqt bo‘yicha xatti-harakatini talabalarga aniq va tushunarli yetkazish o‘qituvchi oldida murakkab didaktik vazifa sifatida turadi. An’anaviy ma’ruza va taxtadagi deduksiyaga tayangan yondashuv ko‘pincha talabaning tasavvurida mantiqiy bog‘lanishlarni yuzaki shakllantiradi; natijada noto‘g‘ri intuitiv qarashlar saqlanib qolishi, nazariy formulalar bilan fizik mazmun o‘rtasida uzilish paydo bo‘lishi mumkin. Shu bois raqamli texnologiyalarni o‘quv jarayoniga integratsiya qilish – interaktiv simulyatsiyalar, dasturlash muhitidagi modellash-

tirish, real vaqt rejimidagi grafik tahlil mavzuni ko‘rgazmali, ishtirokchi va tadqiqotga yo‘naltirilgan shaklda o‘rganishga imkon beradi.

Ushbu maqola raqamli vositalar yordamida statsionar to‘lqin funksiyasini o‘qitishning pedagogik va metodik poydevorini ishlab chiqishga qaratilgan. Yondashuvning markazida bosqichma-bosqich modellashtirish, virtual tajribalar, parametrlarni interaktiv o‘zgartirish va avtomatik tahlil elementlari turadi; ular talabaning kuzatish, solishtirish, xulosa chiqarish va dalillash ko‘nikmalarini faol ishga soladi.

Adabiyotlar tahlili

Kvant mexanikasidagi statsionar to‘lqin funksiyalarini o‘qitish masalasida ikki asosiy jihat qarab o‘tiladi: nazariy-pedagogik yondashuvlar va raqamli texnologiyalarning didaktik samaradorligi. Birinchi jihatda konstruktivistik qarashlar ustuvor bo‘lib, talabaning bilimni faol qurishi, muammoni o‘zi kashf etishi va tajriba orqali mustahkamlashi ta’kidlanadi [1]. Shu nuqtayi nazardan statsionar Shredinger tenglamasi yechimlarini tayyor formulalar sifatida emas, balki bosqichma-bosqich modellashtirish va nazariy farazlarni tekshirish jarayoni sifatida tashkil etish tavsiya qilinadi. Kognitiv yuklama nazariyasi esa mavzuning murakkabligini boshqarish uchun kontentni modullashtirish, bir vaqtning o‘zida faqat bitta asosiy g‘oyani yoritish, ortiqcha dekorativ elementlardan voz kechish, vizual hamda matematik ifodalarni muvozanatli birlashtirishni taklif etadi. Multimedia o‘qitish tamoyillari ham xuddi shu yo‘nalishda dalil keltiradi: grafik, animatsiya va matn uyg‘unlashganda, ayniqsa, $(|\Psi(x,t)|^2)$ ning ehtimollik talqini kabi abstrakt tushunchalar samaraliroq o‘zlashtiriladi [2].

Ikkinchi jihat – raqamli vositalar qo‘llanishi natijasida konseptual tushunchalarga kirish qulaylashishini ko‘rsatadi. Simulyatsiyalar dastlabki intuitiv tasavvurni shakllantiradi, parametrlar bilan interaktiv ishlash esa talabaning sabab-oqibat zanjirini ko‘rishiga yordam beradi.

Adabiyotlarda uchraydigan eng ko‘p muammo to‘lqin funksiyasining fizik ma’nosini, xususan, amplituda, faza va ularning moduli kvadrati bilan bog‘liqligini chalkashtirishdir [3,4]. Talabalar ko‘pincha klassik zarracha-trayektoriya intuitiv tasavvurini kvant hodisalarga ko‘chiradi. Buni yengillashtirish uchun vizualizatsiyada alohida ikki qatlam – modul kvadrati orqali ehtimollik zichligi va fazaning vaqt bo‘yicha tebranishi – bir-biridan farqlanib, didaktik vazifalari aniq belgilanishi zarur. Shu bilan birga, vaqt bo‘yicha statsionarlik va fazodagi eksponensial so‘nishning fizik oqibatlari misollar orqali ko‘rsatilsa, noto‘g‘ri tasavvurlar kamayadi.

O‘quv analitikasi ma’lumotlari asosida adaptivlashtirish mexanizmlarini qo‘llash – murakkablik darajasini moslashtirish, qo‘shimcha ko‘rsatmalar berish va differensial mashqlar taklif etish – o‘zlashtirishni barqarorlashtiradi [5].

Shu bilan birga, qamrovni kengaytirish uchun cheksiz va chegaralangan potensial o‘ralar, garmonik ossillyator va tunnellash kabi mavzular bo‘yicha bosqichma-bosqich modul dizayni ishlab chiqilishi maqsadga muvofiqdir [6]. Umuman, mavjud adabiyotlar statsionar to‘lqin funksiyasini o‘qitishda raqamli vositalar va zamonaviy pedagogik yondashuvlar uyg‘unligi talabaning abstrakt tushunchalarni anglashini tezlashtirishini, ilmiy tafakkur va ijodiy tahlilni rivojlantirishini ko‘rsatadi.

Material va usullar

Internetning ochiq ma’lumotlar to‘plami – foydalanuvchilarga tarmoq orqali uzluksiz va erkin kirish, qidirish hamda o‘qish imkonini beruvchi umumfoydalanuv axborot resurslari majmuasidir. Mavzuga oid o‘quv va ilmiy adabiyotlar tizimli ravishda tahlil qilindi va maqsadga muvofiq tanlandi. Masalani yechishda metodologik asos sifatida analitik tahlil, qiyosiy tahlil va umumlashtirish usullari qo‘llanib, ularning natijalari konseptual xulosalar hamda amaliy ko‘rsatmalarni shakllantirishda mezon sifatida foydalanildi.

Natijalar va muhokama

Kvant to'lqin funksiyasi – bu o'zida modellashtirish, ehtimollik, energiya va vaqt tushunchalarini mujassamlashtirgan yagona nazariy konstruksiyadir [7]. O'qitishda bu funksiyani talabalarga shunchaki matematik formula sifatida emas, balki borliqni ifodalovchi semantik model sifatida tushuntirish zarur.

Masalan:

$$|\Psi(x,t)|^2 = A^2 e^{-2\lambda|x|}$$

Bu ifoda zarrachaning eng katta ehtimol bilan qayerda "bo'lishini" bildiradi. Talaba bu jarayonni raqamli modellashtirish orqali ko'z bilan ko'radi, tafakkur bilan his qiladi. Natijada u formulani yodlamaydi – uni yashaydi. Bu yondashuv kvant tafakkurini shakllantiruvchi metodikaning asosi bo'lishi kerak. Chunki kvant mexanikasida har bir ifoda majoziy va mantiqiy qatlamga ega: u moddiy olamni matematik tilda ifodalaydi, lekin shu bilan birga inson tafakkurining ham aksidir.

Raqamli texnologiyalar kvant mexanikasini o'qitishdagi to'siqlarni imkoniyatga aylantiradi.

Misol uchun, raqamli dasturlar yordamida $(\Psi(x,t))$ ni interaktiv tarzda ko'rsatish orqali:

- talabada fazoviy tasavvur hosil bo'ladi - u zarrachaning qayerda bo'lish ehtimolligini "ko'radi";
- vaqt dinamikasini modellashtirish orqali (ω) parametrining energiya bilan bog'liqligini sezadi;
- λ parametrining fizik ma'nosini o'z tajribasida sinab ko'radi.

Bu jarayon talabaning bilimini tajribaviy ong darajasiga ko'taradi. Kvant mexanikasi mavzulari odatda talabalarda "murakkablik sindromi"ni keltirib chiqaradi. Bunga sabab – tushunchalarning ko'p qatlamli va abstrakt bo'lishidir. Shu bois o'qituvchi dars jarayonini psixologik qulaylik asosida tashkil etishi zarur.

- to'lqin funksiyasi grafigini ko'rsatish orqali talaba "matematik formulaning orqasida turgan haqiqatni" idrok etadi;
- har bir parametr (A, λ, ω) ni o'zgartirib, natijani real vaqt rejimida kuzatish orqali o'z-o'zini boshqarish rivojlanadi;
- "Nega bu funksiya shunday ko'rinishga ega?" degan savol o'rganishga undovchi kuchli ichki impuls bo'ladi.

Bunday yondashuv talabaning kognitiv yuklamasini kamaytiradi, lekin bilimning samarasini orttiradi. Chunki har bir raqamli tajriba - bu tushuncha va sezgi o'rtasidagi ko'prikdir.

1-jadval

Didaktik model: raqamli metodika asosida o'qitish bosqichlari

	Bosqich	Mazmun	Raqamli faoliyat
1	Tushuntirish	To'lqin funksiyasi mazmuni, λ va ω parametrlarining fizik talqini	O'qituvchi 2D grafigini chizadi.
2	Vizual modellashtirish	Fazoviy ehtimol taqsimoti	Raqamli dasturlash yordamida animatsiya
3	Tadqiqot	λ o'zgarganda energiya spektrining o'zgarishini tahlil qilish	Talaba interaktiv slayder orqali modellashtiradi
4	Muhokama va refleksiya	Talabalar model natijasini tahlil qiladi, o'z xulosasini beradi	Onlayn interaktiv taqdimot yoki test
5	Baholash	Raqamli diagnostika, avtomatik tahlil	O'quv platforma orqali o'zlashtirishni tahlil qilish

Natijada dars bir yo‘nalishli jarayon emas, balki dialogik, ijodiy va dinamik muhitga aylanadi.

Kvant mexanikasi – bu o‘z mohiyatiga ko‘ra ko‘p darajali tafakkur modeli. Uning o‘qitilishi ham shunga monand bo‘lishi kerak [8]. $\Psi(x,t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t}$ to‘lqin funksiyasi orqali talaba faqat matematik tahlilni emas, balki fikrlashning yangi paradigmasini o‘zlashtiradi – ehtimollik, aniqlik, vaqt va fazo munosabatini bir butun sifatida ko‘radi. Raqamli texnologiyalar esa bu jarayonni inson tafakkurining raqamli kengaytmasiga aylantiradi. Raqamli o‘qitish sharoitida kvant mexanikasi ilmiy bilishning raqamli modeli, pedagogik yangilanishning asosi va tafakkur texnologiyasi sifatida namoyon bo‘ladi.

Quyida bayon etilgan didaktik yondashuvni aniq hisoblash vazifasi orqali tekshiramiz. Statsionar to‘lqin funksiyasi uchun normallash, kutilayotgan qiymatlar va standart og‘ish bosqichma-bosqich aniqlanadi. Natijalar ehtimollik zichligining grafigi bilan vizual tekshiriladi hamda markaziy va “dum” sohalar ehtimoli baholanadi. Shu orqali nazariy mulohazalar amaliy tahlil bilan mustahkamlanadi.

Zarraning to‘lqin funksiyasi quyidagi ko‘rinishda berilgan bo‘lsin:

$$\Psi(x,t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t}$$

Bu yerda A, λ va ω – musbat haqiqiy doimiylar. (a) Ψ ni normallashtirish; (b) $\langle x\rangle$ va $\langle x^2\rangle$ kutilayotgan qiymatlarni aniqlash. (c) x ning standart og‘ishini (σ) topish talab etilsin. $|\Psi|^2$ ni x ga bog‘liq holda grafik chizing va unda $\langle x\rangle \pm \sigma$ nuqtalarni belgilash, shuningdek, zarracha shu oraliqning tashqarisida bo‘lish ehtimolligini aniqlash ham talab etilsin [9].

Masalaning yechilishi:

a) normallash shartiga berilgan to‘lqin funksiya ifodasini qo‘yamiz:

$$\int_{\infty}^{-\infty} |\Psi|\,dx = 1 \;\Rightarrow\; |A|^2 \int_{\infty}^{-\infty} e^{-2\lambda|x|}dx = 1$$

$$\int_{\infty}^{-\infty} e^{-2\lambda|x|}dx = 2\int_{0}^{\infty} e^{-2\lambda x}dx = 2\cdot\frac{1}{2\lambda} = \frac{1}{\lambda}.$$

Demak, $|A|^2 \cdot \frac{1}{\lambda} = 1$, bundan

$$\boxed{A = \sqrt{\lambda}}$$

b) $$\langle x\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x\,|\Psi|^2 dx = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} x\,e^{-\lambda|x|}dx$$

$xe^{-\lambda|x|}$ funksiya toq funksiya, shuning uchun integral nolga teng. Demak, $\langle x\rangle = 0$.

$$\langle x^2\rangle = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} x^2\,e^{-2\lambda|x|}dx = 2\lambda \int_{0}^{\infty} x^2\,e^{-2\lambda x}dx$$

$$\int_0^{\infty} x^2\,e^{-ax}dx = \frac{2}{a^3}(a>0),$$

bu yerda $a = 2\lambda$. Demak,

$$\int_{0}^{\infty} x^2\,e^{-2\lambda x}dx = \frac{2}{(2\lambda)^3} = \frac{2}{8\lambda^3} = \frac{1}{4\lambda^3}.$$

$$\langle x^2\rangle = 2\lambda\cdot\frac{1}{4\lambda^3} = \frac{1}{2\lambda^3}$$

Dispersiya (standartdan og'ish)

$$\sigma = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 = \frac{1}{2\lambda^3} - 0 = \frac{1}{2\lambda^3}$$

$\Psi^2 = \lambda e^{-2\lambda|x|}$ – juft funksiya, $x = 0$ da "pik" mavjud va ikkala tomonda eksponensial ravishda kamayadi. Maksimum *x*=0 da: $\Psi^2(0) = \lambda$ (1-rasmga qarang).

$\langle x \rangle = 0$ va $\langle x \rangle \pm \sigma = \pm\frac{1}{\sqrt{2}\lambda}$. Shu nuqtalarni grafikda belgilash – sigmaning "tarqalishini" qanday o'lchash tasvirini beradi, ya'ni ehtimollik zichligi markaz atrofida ushbu oraliqga jamlangan bo'ladi.

Navbatda zarrachani shu oraliq tashqarisida topilish ehtimolligini aniqlaymiz:

$$\omega(|x| > \sigma) = 1 - \omega(|x| \leq \sigma)$$

Dastlab quyidagini hisoblaymiz:

$$\omega(|x| \leq \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} \lambda e^{-2\lambda|x|} dx = 2\lambda \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-2\lambda x} dx = 2\lambda \cdot \frac{1 - e^{-2\lambda\sigma}}{2\lambda} =$$

$$= 1 - e^{-2\lambda\sigma}.$$

Shuning uchun

$$\omega(|x| > \sigma) = e^{-2\lambda\sigma}$$

Endi

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}\lambda}$$

ni qo'ysak,

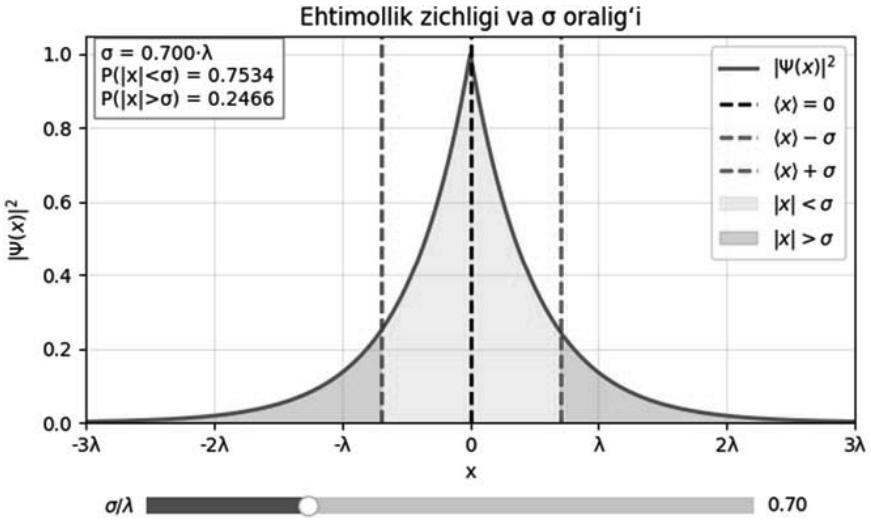
$$-2\lambda\sigma = -2\lambda\frac{1}{\sqrt{2}\lambda} = -\sqrt{2}$$

va

$$\omega(|x| > \sigma) = e^{-\sqrt{2}} \approx 0{,}2431, \text{ ya'ni } 24{,}31\ \%.$$

Demak, taxminan 24.3% ehtimollik bilan zarracha $\langle x \rangle \pm \sigma$ oralig'idan tashqarida topiladi. Bu qiymat 1-rasmda qizg'ish rangda berilgan [10].

Masala yechimiga qo'shimcha sifatida $|x| > \sigma$ oraliqda zarrani aniqlash ehtimolligini aniqlaymiz.



1-rasm.

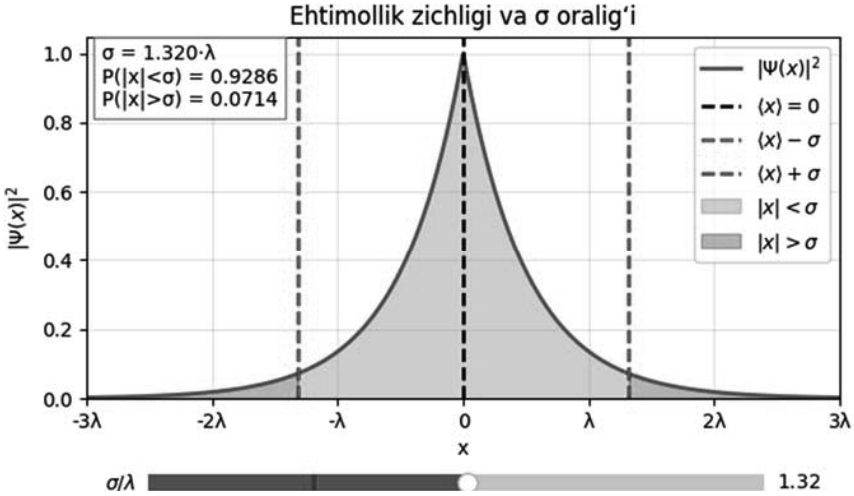
$$\omega(|x| < \sigma) = 2\lambda \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-2\lambda x} dx = 2\left[-\frac{1}{2}e^{-2\lambda\sigma}\right]_0^{\sigma} = 1 - e^{-2\lambda\sigma}$$

$$\omega(|x| < \sigma) = 1 - e^{-2\lambda\frac{1}{\sqrt{2}\lambda}} = 1 - e^{-\sqrt{2}} \approx 1 - 0{,}2431 \approx 0{,}7534$$

yoki 75,34 %. Bu qiymat 1-rasmda sarg‘sh rang bilan berilgan.

Yana shuni ta’kidlash kerakki, $\omega(|x| < \sigma) + \omega(|x| > \sigma) = 0{,}7534 + 0{,}2431 \approx 1$ bo‘lib, bu to‘lqin funksiyaning chekli bo‘lish shartini qanoatlantiradi.

Hisoblangan natijalar grafikdagi ko‘rsatkichlar bilan uyg‘un chiqdi: markaziy hududda jamlanish, “dum”larda kamayish va simmetriya vizual ko‘rinishda aniq tasdiqlandi. O‘rtacha qiymat nolga tengligi vertikal markaziy chiziq bilan mos, standart og‘ish nuqtalari esa rangli sohalar chegaralari bilan bir xil joylashdi. Markaziy va tashqi sohalar ehtimoli grafik osti yuzalari bilan son jihatdan yaqin chiqdi; kichik tafovutlar diskretlash va chizish aniqligiga bog‘liq. Umuman olganda, analitik hisob va grafik vizualizatsiya o‘zaro mantiqan va son jihatdan mos keldi.



2-rasm.

Dastur (grafikli interaktiv modul)ning asosiy imkoniyatlari quyidagilar (2-rasm):

- σ/λ qiymatini o‘zgartirish bilan qizil punktir chiziqlar $\langle x\rangle \pm \sigma$ darhol siljiydi;
- $P(|x|<\sigma)$ va $P(|x|>\sigma)$ ehtimolliklari real vaqt rejimida yangilanadi va oynachada ko‘rsatiladi;
- markaziy hudud $(|x|<\sigma)$ sarg‘ish, dumlar $(|x|>\sigma)$ qizg‘ish soyada to‘liq bo‘yaladi.
- x o‘qi λ birliklarda (“λ, 2λ, ...”), markaziy $\langle x\rangle = 0$ chizig‘i ko‘rinadi.
- $|\Psi(x)|^2 = (1/\lambda)\cdot\exp(-2|x|/\lambda)$ asosida hisob; normalizatsiya, simmetriya va maksimum avtomatik tekshiriladi;
- talaba parametr-natija bog‘liqligini ko‘z bilan ko‘radi, “markaz va dum” tushunchasi mustahkamlanadi;
- hisoblangan qiymatlar grafik osti maydonlari bilan mos kelishi vizual ravishda baholanadi.

Raqamli texnologiyalar interaktiv modellashtirish, avtomatik hisob va real vaqt vizualizatsiyasi orqali mavzuni aniq, tez va ko‘rgazmali o‘rganish imkonini berdi. Ular reproduktivlik va ishonchlilikni ta’minlab, hisob natijalarini grafik bilan darhol solishtirish va tahlil qilishni yengillashtirdi.

Xulosa

Mazkur ishda ($\Psi(x,t) = Ae^{-\lambda|x|}e^{-i\omega t}$) ko'rinishidagi to'lqin funksiyasi misolida kvant mexanikasining markaziy tushunchalarini raqamli texnologiyalar yordamida o'qitish bo'yicha yaxlit metodika taklif qilindi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, raqamli modellashtirish talabaning abstrakt g'oyalarni idrok etishini sezilarli darajada yengillashtiradi: amplituda va fazaning fazoviy-vaqtinchalik xatti-harakati ko'rgazmali ochib beriladi, ($|\Psi(x,t)|^2$) ehtimollik zichligining fizik mazmuni chuqurroq anglanadi.

Taklif etilgan bosqichma-bosqich modellashtirish, virtual tajribalar va avtomatik tahlil elementlari:

- konseptual tushunchalarni "ko'rinarli" qiladi va noto'g'ri tasavvurlarni erta aniqlaydi;
- talabaning tadqiqot kompetensiyasini (faraz qo'yish, parametrlarni o'zgartirib tekshirish, dalillash) rivojlantiradi;
- mantiqiy tahlil va ijodiy fikrlashni qo'llab-quvvatlaydi.

Amaliy jihatdan, metodika dars ssenariylarida quyidagilarning samarali ekanini ko'rsatdi: (a) normallash va ($|\Psi(x,t)|^2$) ni real vaqt rejimida hisoblash hamda vizualizatsiya qilish, (b) parametrlar (masalan, λ, ω) bo'yicha sezgirlik tahlili, (c) kodga asoslangan miniloyihalar orqali mustaqil izlanishni rag'batlantirish.

Cheklov sifatida raqamli vositalarga tayanuvchanlik texnik infratuzilma va dasturiy savodxonlikni talab qiladi; shu bois darsdan oldingi qisqa "texnik tayyorgarlik" bloki, shuningdek, internet past bo'lgan sharoitlar uchun oflayn eksport variantlari tavsiya etiladi.

Umuman olganda, ushbu metodika kvant to'lqin funksiyasini o'qitishda tushunarlilik, izchillik va tadqiqotga yo'naltirilganlikni ta'minlab, talabaning ilmiy tafakkuri, mantiqiy tahlili va ijodiy fikrlashini rivojlantirishga xizmat qiladi.

Adabiyotlar:

1. *Jalolova P.M*. Atom fizikasini raqamli texnologiyalardan foydalanib o'qitish asosida talabalarning kasbiy tayyorgarligini rivojlantirish metodikasi: Ped. fan. dokt. (DsC) …diss. avtoref. – Chirchiq: O'zMU, 2022. – 58 b.

2. *Петрова Д. В*. Изучение фундаментальных положений квантовой физики на разных уровнях образования: автореф. дисс. … канд. пед. наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 26 с.

3. *Хильманович В.Н*. Особенности и эффективность педагогической модели преподавания основ квантовой механики в высшей школе. // Физическое образование в вузах. – 2011. – Т. 17. – № 2. – С.137–140.

4. Зырянов Е. А. Философские проблемы квантовой механики. //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – Т. 3. – С. 870–874.

5. *Лидер А.М., Склярова Е.А., Сёмкина Л.И*. Вопросы методики преподавания курса физики в техническом университете. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–4. – С. 787–790.

6. *Харченко В.И*. Преподавание дисциплины «Квантовая механика и квантовая химия» в системе высшего образования. // Современные наукоемкие технологии. – 2006. – № 3. – С. 81–82.

7. *Томко Е.В*. Изучение барьерных эффектов в курсе квантовой механики с помощью компьютерного эксперимента. // Проблемы современного физического образования. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: Изд-во БашГУ, 2019. – С. 108–109.

8 *Muxtarov E.K*. "Cheksiz chuqur potensial o'ra" mavzusini raqamli texnologiyalar yordamida o'qitish metodikasini takomillashtirish. // NamDU ilmiy axborotnomasi. – 2025. – №8. – B. 625–631.

9. *Muxtarov E.K.* Kvant mexanikasidan mashqlar, tavsifiy masalalar va ularning yechimlari. O‘quv qo‘llanma. – Nukus: Ilmiy va o‘quv adabiyotlar nashriyoti. 2023. – 196 b.

10. *Трофименко В.Е*. Microsoft Visual Studio. Учебный курс. – Москва: Диалектика, 2021. – 320 с.

PEDAGOGICAL BASIS OF TEACHING THE STATIONARY WAVE FUNCTION IN QUANTUM MECHANICS USING DIGITAL TECHNOLOGIES

Erkinjon K.Mukhtarov[1]

Ilmiy xabarnoma. Seriya: Pedagogik tadqiqotlar – Scientific bulletin. Series: Pedagogical Research. 2025. 2 (86). 13-21.

[1]Andijan State University, Andijan, 170100, str. University, 129 (Uzbekistan). E-mail: agsu_info@edu.uz

Key words: quantum mechanics, wave function, digital learning, visualization, teaching methodology, virtual learning environment, probability density.

The article is devoted to developing the pedagogical foundations for teaching one of the core concepts of quantum mechanics- the stationary wave function-using digital technologies. It proposes a step-by-step didactic scenario aligned with students' intuitive understanding to present the physical meaning of the wave function, its connection to probability density, and the spatiotemporal behavior of amplitude and phase.

The study analyzes open sources (the National Database of Legislative Information of the Republic of Uzbekistan, relevant textbooks and research literature, and open educational resources) and employs analytical and comparative analysis, synthesis, and elements of learning analytics. Instruction is structured in three stages: an introductory phase (conceptual explanation and visual demonstration), interactive modeling (parameter variation, real-time plots, computation of probability regions), and concluding mini-projects (presentation of results, reflection, and discussion). Formative assessment involves short quizzes, automated checking blocks, and an "exit ticket" approach; summative assessment covers lab reports, code quality, and oral presentations.

The main findings indicate that visual and interactive methods significantly strengthen students' understanding of the wave function and its probabilistic interpretation via the modulus squared; directly observing parameter sensitivity (e.g., spatial decay rate and temporal oscillation frequency) reduces common misconceptions. Using interactive sliders to display, in real time, the probabilities of "central" and "tail" regions helps students perceive causal relationships and connect mathematical results to physical meaning. Adaptation based on learning-analytics signals-adjusting task difficulty, providing targeted hints, and offering differentiated exercises-stabilizes mastery and boosts motivation for independent inquiry.

The study's novelty lies in unifying digital modeling, visualization, and automated analysis elements into a single didactic framework for teaching the stationary wave function; the methodological package includes learning tasks, as-

sessment rubrics, and open-code templates. Its practical value is that the proposed approach allows instructors to deliver the topic effectively even under infrastructural constraints (with offline export materials), while enabling students to "experience" abstract concepts through demonstrative experiments. The methodology can be extended to other potentials, tunneling phenomena, and higher-dimensional models in subsequent stages.

References:

1. Jalolova, P.M. (2022) Atom fizikasini raqamli texnologiyalardan foydalanib o'qitish asosida talabalarning kasbiy tayyorgarligini rivojlantirish metodikasi [Methodology of developing professional training of students based on teaching atomic physics using digital technologies]. The Dissertation for Doctor of Pedagogical Sciences (DSc). Chirchiq: O'zMU.

2. Petrova, D. V. (2015) Izuchenie fundamental'nyh polozhenij kvantovoj fiziki na raznyh urovnyah [Studying the fundamental principles of quantum physics at different levels of education]. Abstract of Dissertation for the Candidate of pedagogical Sciences. Sankt-Peterburg.

3. Xilmanovich, V.N. (2011) Osobennosti i effektivnost' pedagogicheskoj modeli prepodavaniya osnov kvantovoj mekhaniki v vysshej shkole [Special features and effectiveness of the pedagogical model of elementary quantum mechanics teaching in high school]. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzah*. Vol. 17. No 2. Pp.137-140.

4. Ziryanov, E.A. (2022) Filosofskie problemy kvantovoj mekhaniki [Philosophical problems of quantum mechanics]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*. Vol. 3. Pp. 870-874.

5. Lider, A.M., Sklyarova, E.A., Syomkina L.I. (2015) . Voprosy metodiki prepodavaniya kursa fiziki v tekhnicheskom universitete [Voprosy methodology of teaching in physics and technical university]. *Fundamental'nye issledovaniya*. No 2–4. – S. 787-790.

6. Xarchenko, V.I. (2006) Prepodavanie dissiplini «Kvantovaya mexanika i kvantovaya ximiya» v sisteme visshego obrazovaniya [Teaching the discipline "Quantum mechanics and quantum chemistry" in the system of higher education]. *Covremennie naukoemkie texnologii*. . No 3. Pp. 81-82.

7. Tomko, E.V. (2019) . Izuchenie bar'ernyh effektov v kurse kvantovoj mekhaniki s pomoshch'yu komp'yuternogo eksperimenta [Studying barrier effects in a quantum mechanics course using a computer experiment]. Problemy sovremennogo fizicheskogo obrazovaniya. Materialy V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Problems of modern physics education. Proceedings of the 5th All-Russian scientific and practical conference.]. Ufa: Izd-vo BashGU. Pp. 108-109.

8 Muxtarov, E.K. (2025) "Cheksiz chuqur potensial o'ra" mavzusini raqamli texnologiyalar yordamida o'qitish metodikasini takomillashtirish ["Improving the Methodology of Teaching the Topic 'Infinite Potential Well' through Digital Technologies"]. *NamDU ilmiy axborotnomasi*. No 8. Pp. 625-631.

9. Muxtarov, E.K. (2023) Kvant mexanikasidan mashqlar, tavsifiy masalalar va ularning yechimlari [Exercises in quantum mechanics, descriptive problems and their solutions]. Nukus: Ilmiy va o'quv adabiyotlar nashriyoti.

10. Trofimenko, V.E. (2021) Microsoft Visual Studio. Uchebnyj kurs. [Microsoft Visual Studio: Training Course]. Moscow: Dialektika.

Muallif haqida ma'lumot:

MUXTAROV Erkinjon Kobiljonovich – Andijon davlat universiteti Umumiy fizika kafedrasi dotsenti. E-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com