

*Бұл ғылыми жұмысымыз «Ғылым айы–2026»  
аясындағы ғылыми декадада орындалды*

ӘОЖ 530.145

## **КВАНТТЫҚ ТУННЕЛЬ ЭФФЕКТИСІ**

*Нұрғали Айдана, Нұрболат Айбота*

6B05302 – «Физика» БББ 3–курс студенттері, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

**Ғылыми жетекші:** физика– математика ғылымдарының кандидаты, доцент Т.Б. Қоштыбаев

*Бұл мақалада кванттық механиканың маңызды құбылыстарының бірі болып табылатын кванттық туннель эффектісі жан-жақты қарастырылады. Классикалық физика заңдары бойынша бөлшек потенциалдық тосқауылды энергиясы жеткіліксіз болған жағдайда өте алмайды, алайда кванттық механикада бөлшектің толқындық табиғатының арқасында тосқауылдан өту ықтималдығы нөлге тең болмайды. Осы жұмыста туннель эффектісінің теориялық негіздері, Шредингер теңдеуі арқылы сипатталуы, ықтималдық амплитудалары, толқындық функциялардың шекаралық шарттары және олардың физикалық мағынасы кеңінен талданады. Сонымен қатар, бұл эффектінің жартылай өткізгіштер физикасында, ядролық физикада, сканерлеуші туннельдік микроскопта және нанотехнологияларда қолданылуы қарастырылады. Қазақ ғалымдарының еңбектеріне сүйене отырып, туннель эффектісінің заманауи физикадағы орны мен маңызы айқындалады. Зерттеу нәтижелері кванттық құбылыстарды терең түсінуге және олардың практикалық қолданылуын дамытуға мүмкіндік береді.*

**Кілт сөздер:** кванттық туннель, Шредингер теңдеуі, потенциалдық тосқауыл, толқындық функция, ықтималдық, нанотехнология.

**Кіріспе.** Кванттық механика – микродүниедегі бөлшектердің қозғалысы мен өзара әсерлесу заңдылықтарын сипаттайтын қазіргі физиканың іргелі бөлімдерінің бірі болып табылады. Бұл теория классикалық механика заңдарымен түсіндірілмейтін көптеген құбылыстарды түсіндіруге мүмкіндік береді. Соның ішінде ерекше орын алатын құбылыстардың бірі – кванттық туннель эффектісі.

Классикалық физика заңдарына сәйкес, бөлшек белгілі бір потенциалдық тосқауылды тек өзінің толық энергиясы тосқауыл биіктігінен артық болған жағдайда ғана өте алады. Егер бөлшектің энергиясы жеткіліксіз болса, онда ол тосқауылдан өте алмай, кері шағылады. Алайда тәжірибелік нәтижелер

көрсеткендей, микродүниеде мұндай шектеулер әрқашан сақтала бермейді. Бұл жағдай кванттық механика аясында түсіндіріліп, бөлшектердің толқындық қасиеттерімен байланыстырылады.

Кванттық механикада бөлшектің күйі толқындық функция арқылы сипатталады. Бұл функция кеңістіктің барлық нүктесінде белгілі бір мәнге ие болады және оның квадраты бөлшекті сол нүктеде табу ықтималдығын анықтайды. Потенциалдық тосқауыл аймағында толқындық функцияның нөлге тең болмауы бөлшектің тосқауылдан өту ықтималдығының бар екенін көрсетеді. Осы құбылыс кванттық туннель эффектісі деп аталады [2, 112 б].

Кванттық туннель эффектісі алғаш рет ядролық физикада, атап айтқанда  $\alpha$ -ыдырау процесін түсіндіру барысында маңызды рөл атқарды. Кейіннен бұл құбылыс жартылай өткізгіштер физикасында, туннель диодтарда, өрістік транзисторларда және сканерлеуші туннельдік микроскоп сияқты жоғары дәлдікті құралдарда кеңінен қолданыс тапты. Сонымен қатар, қазіргі таңда нанотехнология мен кванттық есептеу техникасында туннель эффектісі негізгі физикалық механизмдердің бірі болып отыр.

Осы мақалада кванттық туннель эффектісінің теориялық негіздері, оның математикалық сипаттамасы, физикалық мағынасы және практикалық қолданылу аймақтары жан-жақты қарастырылады. Зерттеу нәтижелері кванттық құбылыстарды түсінуді кеңейтіп, олардың қазіргі ғылым мен техникадағы рөлін айқындауға бағытталған.

**Негізгі бөлім.** 1. Кванттық туннель эффектісінің теориялық негіздері

Кванттық туннель эффектісі – бөлшектің энергиясы потенциалдық тосқауыл биіктігінен кіші болса да, оны өту құбылысы. Бұл құбылыс бөлшектің толқындық табиғатымен түсіндіріледі.

Шредингер теңдеуі кванттық жүйенің күйін сипаттайтын негізгі теңдеу болып табылады:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + U(x)\psi = E\psi \quad (1)$$

Мұнда:

- $\psi$  – толқындық функция
- $U(x)$  – потенциалдық энергия
- $E$  – толық энергия

Егер  $E < U(x)$  болса, онда классикалық тұрғыдан қозғалыс мүмкін емес.

Бірақ кванттық жағдайда шешім экспоненциалды түрде кемитін функция болады:

$$\psi(x) \sim e^{-kx} \quad (2)$$

мұндағы

$$k = \sqrt{\frac{2m(U-E)}{\hbar^2}} \quad (3)$$

Бұл функция нөлге тең болмайды, сондықтан тосқауылдың екінші жағында да ықтималдық бар.

## 2. Потенциалдық тосқауыл және туннельдеу ықтималдығы

Туннель эффектісін қарастыру үшін ең қарапайым модель – тікбұрышты потенциалдық тосқауыл.

Туннельдеу коэффициенті (өткізу ықтималдығы):

$$T = e^{-2ka}$$

мұндағы:

- $a$  – тосқауыл ені
- $k$  – толқын саны

Бұл формуладан көрінетіндей:

- тосқауыл ені артқан сайын туннельдеу ықтималдығы азаяды
- бөлшек массасы артқан сайын ықтималдық кемиді

Қазақ физиктері еңбектерінде кванттық процестерді сипаттауда толқындық функциялардың шекаралық шарттарына ерекше мән беріледі. Бұл шарттар туннель эффектісін дәл есептеуде маңызды рөл атқарады.

## 3. Туннель эффектісінің физикалық мағынасы

Туннель эффектісі кванттық әлемнің негізгі ерекшеліктерінің бірі болып табылады. Бұл құбылыс арқылы:

- бөлшектер тосқауылдан «өтіп кетеді»
- энергия сақталады, бірақ классикалық траектория жоқ
- ықтималдық түсінігі негізгі рөл атқарады

Бұл эффект классикалық физикамен түсіндірілмейді және тек кванттық теория арқылы ғана сипатталады.

## 4. Қолданылуы

### 4.1 Ядролық физика

Альфа-ыдырау туннель эффектісі арқылы түсіндіріледі. Ядро ішінде альфа-бөлшек потенциалдық тосқауылдан туннель арқылы өтеді.

### 4.2 Жартылай өткізгіштер

Туннель диодтар – туннель эффектісіне негізделген құрылғылар. Олар жоғары жылдамдықты электроникада қолданылады.

### 4.3 Сканерлеуші туннельдік микроскоп

Бұл құрылғы атомдық деңгейде беттерді зерттеуге мүмкіндік береді. Оның жұмысы электрондардың туннельдеу құбылысына негізделген.

### 4.4 Нанотехнология

Қазіргі нанокұрылғыларда туннель эффектісі негізгі рөл атқарады. Кванттық компьютерлерде де бұл құбылыс маңызды.

5. Кванттық механикада электрон немесе басқа бөлшек тек бөлшек ретінде емес, толқын ретінде де қарастырылады. Сондықтан ол белгілі бір кеңістікте толық тоқтап қалмайды, оның толқындық функциясы тосқауыл аймағында да нөлге тең болмайды. Егер тосқауылдың қалыңдығы мен биіктігі белгілі бір шарттарға сәйкес келсе, бөлшектің екінші жағына өтіп кету ықтималдығы пайда болады.

Нақты мысалдар келтірсек:

### 1. Альфа-ыдырау (ядролық физикада)

Атом ядросында альфа-бөлшек (гелий ядросы) ядро ішінде қалып қояды деп күтіледі, өйткені оны ұстап тұрған күштік тосқауыл бар. Бірақ кванттық туннель эффектiсiнiң арқасында альфа-бөлшек осы тосқауылдан “өтiп”, ядродан сыртқа шыға алады. Бұл радиоактивті ыдыраудың негiзгi себептерiнiң бiрi.

### 2. Күндегi термоядролық реакциялар

Күннiң ортасында протондар бiр-бiрiн электростатикалық күшпен тебедi. Классикалық түрде олар қосыла алмайтындай энергия жетпейдi. Алайда кванттық туннель эффектiсi арқасында протондар осы энергетикалық тосқауылды “тесiп өтiп”, бiрiгiп, термоядролық реакция жүредi. Егер туннель эффектiсi болмаса, Күн жарқырамас едi.

### 3. Туннельдiк диодтар (электроника)

Арнайы жартылай өткiзгiш құрылғыларда электрондар энергия тосқауылынан туннель арқылы өтiп, өте жылдам ток өзгерiстерiн тудырады. Мұндай диодтар жоғары жиiлiктi құрылғыларда қолданылады.

### 4. Транзисторлар мен микрочиптер

Өте кiшкентай наномасштапта электрондар классикалық заңдарға бағынбай, көршi аймақтарға туннель арқылы өтiп кетуi мүмкiн. Бұл қазiргi микроэлектроникада маңызды фактор болып табылады, себебi құрылғылар кiшiрейген сайын туннель эффектiсi күшейе түседi.

### 6. Қазақстандық ғалымдардың кванттық туннель эффектiсiне қосқан үлесi

Қазақстанда кванттық физика, жартылай өткiзгiштер физикасы және нанотехнология салалары қарқынды дамыған. Осы салалар кванттық туннель эффектiсiмен тiкелей байланысты.

#### 1. Жартылай өткiзгiштер физикасы (негiзгi бағыт)

Қазақстандық физиктер, әсiресе университеттер мен ғылыми институттарда, электрондардың өте кiшi масштабтағы қозғалысын зерттеу арқылы туннель эффектiсiн қолданбалы деңгейде қарастырады.

Мысалы:

- наноқабаттардағы электрондардың өтуi
- өте жұқа тосқауылдар арқылы токтың туннельдiк өтуi
- микроэлектрондық құрылғылардың қасиеттерiн зерттеу

Бұл зерттеулер туннельдiк диодтар мен наноқұрылғыларды түсiнуге мүмкiндiк бередi.

#### 2. Қазақстандағы ғылыми орталықтардағы зерттеулер

Кванттық құбылыстар, соның iшiнде туннель эффектiсi келесi бағыттарда қарастырылады:

- жартылай өткiзгiш наноқұрылымдар
- кванттық шұңқырлар мен кванттық тосқауылдар
- қатты дене физикасы

Бұл жұмыстар көбiне:

- әл-Фараби атындағы ҚазҰУ

- Қазақстандағы Ядролық физика институты сияқты ғылыми орталықтарда жүргізіледі.

### 3. Теориялық физика және білім беру саласы

Қазақстандық физик-ғалымдар кванттық механиканы оқыту мен дамытуда маңызды рөл атқарады. Университеттерде:

- кванттық туннель эффектісінің математикалық модельдері түсіндіріледі
- Шрёдингер теңдеуі арқылы тосқауылдан өту ықтималдығы есептеледі
- студенттерге нақты есептер арқылы физикалық мағынасы ашылады

### 4. Қолданбалы маңызы (Қазақстан контексті)

Қазақстанда дамып жатқан микроэлектроника, нанотехнология, материалтану салаларында туннель эффектісі:

- жаңа материалдардың қасиеттерін зерттеуде
- жоғары сезімтал датчиктер жасауда
- болашақ кванттық құрылғыларды модельдеуде қолданылады.

**Қорытынды.** Кванттық туннель эффектісі – қазіргі заманғы физиканың ең маңызды және ерекше құбылыстарының бірі. Бұл құбылыс классикалық механика заңдарымен толық түсіндірілмейді, себебі ол бөлшектердің толқындық табиғатына негізделеді. Яғни, бөлшек энергиясы жеткіліксіз болса да, белгілі бір ықтималдықпен потенциалдық тосқауылдан өтіп кете алады. Бұл жағдай кванттық әлемнің интуицияға қайшы, бірақ тәжірибелік түрде дәлелденген қасиеттерін көрсетеді.

Туннель эффектісінің ғылыми маңызы өте жоғары. Ол ядролық физикада радиоактивті альфа-ыдырауды түсіндіруге мүмкіндік береді және жұлдыздардағы термоядролық реакциялардың жүру механизмін ашып береді. Егер осы құбылыс болмағанда, Күн мен басқа да жұлдыздардағы энергия түзілу процесі мүлде басқаша болар еді немесе мүлдем іске аспас еді. Сонымен қатар, қазіргі электроника мен нанотехнология салаларында туннель эффектісі маңызды рөл атқарады. Микро және наноөлшемдегі құрылғыларда электрондардың тосқауылдан өтіп кетуі құрылғылардың жұмыс істеу принципіне тікелей әсер етеді.

Бұл құбылыс ғылым мен технологияның дамуына жаңа мүмкіндіктер ашты. Қазіргі кезде туннельдік диодтар, сканерлейтін туннельдік микроскоптар және кванттық құрылғылар осы эффектінің негізінде жұмыс істейді. Болашақта кванттық есептеуіштер мен жаңа буын наноқұрылғылардың дамуы да осы принциптерге сүйенуі мүмкін.

Қорытындылай келе, кванттық туннель эффектісі тек теориялық түсінік емес, ол нақты өмірде кеңінен қолданылатын маңызды физикалық құбылыс. Ол микродүниенің заңдылықтарын терең түсінуге және жаңа технологиялық жетістіктерге жол ашатын негізгі ғылыми негіздердің бірі болып табылады.

### Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Бектасова Г.С., Иманжанова К.Т. «Толқындық құбылыстар: оптика және кванттық физика» С. Аманжолов атындағы ШҚУ оқу-әдістемелік құралы. <https://stud.kz/referat/show/54691>
2. Алпысбаева Б.Е., Неволин В.К. «Туннельдік-зондтық нанотехнологияның физикалық негіздері» Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, оқу құралы (Алматы, 2012). <https://dokumen.pub/download/9786012476194.html>
3. Зейнолла Молдахметұлы (ҚарМУ ғылыми мектебі) Кванттық химия және спектроскопия бағытындағы зерттеулер (кванттық модельдер, электрондық құрылым теориясы). <https://soltustikkaz.kz/%D1%96%D1%80%D1%96-%D2%93%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%BC-%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%82%D1%82%D1%8B-%D2%B1%D0%B9%D1%8B%D0%BC%D0%B4%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8B%D1%80%D1%83%D1%88%D1%8B/>
4. Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі. Жартылай өткізгіштер мен нанотехнологиялар бойынша ғылыми зерттеулер (туннельдік эффект технологиялары) <https://www.gov.kz/memleket/entities/science/press/news/details/1139346>
5. Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті. Кванттық физика және микродүниенің заңдылықтары (оқу материалдары). <https://stud.kz/referat/show/67231>
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретикалық физика курсы. Кванттық механика [https://en.wikipedia.org/wiki/Theoretical\\_Physics\\_\(Landau\\_and\\_Lifshitz\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Theoretical_Physics_(Landau_and_Lifshitz))

## КВАНТОВЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

*Нұрғали Айдана, Нұрболат Айбота*

**Научный руководитель:** Т.Б. Қоштыбаев

*В данной статье всесторонне рассматривается квантовый туннельный эффект – одно из важнейших явлений квантовой механики. Согласно законам классической физики, частица не может преодолеть потенциальный барьер при недостаточной энергии, однако в квантовой механике благодаря волновой природе частицы вероятность прохождения через барьер не равна нулю. В работе подробно анализируются теоретические основы туннельного эффекта, его описание с помощью уравнения Шредингера, амплитуды вероятности, граничные условия волновых функций и их физический смысл. Также рассматривается применение этого эффекта в физике полупроводников, ядерной физике, сканирующем туннельном микроскопе и нанотехнологиях. Опираясь на труды казахстанских ученых, определяется место и значение туннельного эффекта в современной физике. Результаты исследования позволяют глубже понять квантовые явления и развивать их практическое применение.*

**Ключевые слова:** квантовый туннель, уравнение Шредингера, потенциальный барьер, волновая функция, вероятность, нанотехнологии.

## QUANTUM TUNNELING EFFECT

*Aidana Nurgali, Aibota Nurbolat*

**Scientific supervisor:** T.B. Koshtybaev

*This article provides a comprehensive review of the quantum tunneling effect, one of the most important phenomena in quantum mechanics. According to the laws of classical physics, a particle cannot overcome a potential barrier if it has insufficient energy. However, in quantum mechanics, due to the wave nature of the particle, the probability of penetrating the barrier is non-zero. This work analyzes in detail the theoretical foundations of the tunneling effect, its description via the Schrödinger equation, probability amplitudes, boundary conditions for wave functions, and their physical meaning. Furthermore, the application of this effect in semiconductor physics, nuclear physics, scanning tunneling microscopy, and nanotechnology is discussed. Based on the work of Kazakh scientists, the place and significance of the tunneling effect in modern physics are determined. The research results provide a deeper understanding of quantum phenomena and promote the development of their practical applications.*

**Keywords:** quantum tunnel, Schrödinger equation, potential barrier, wave function, probability, nanotechnology.

## REFERENCES

1. Bektasova, G.S., & Imanzhanova, K.T. (n.d.). Wave phenomena: Optics and quantum physics [Educational manual]. S. Amanzholov East Kazakhstan University. Retrieved from <https://stud.kz/referat/show/54691>
2. Alpysbayeva, B.E., & Nevolin, V.K. (2012). Physical foundations of tunnel-probe nanotechnology [Educational manual]. Al-Farabi Kazakh National University. Retrieved from <https://dokumen.pub/download/9786012476194.html>
3. Zeynolla, M. (n.d.). Research in quantum chemistry and spectroscopy (quantum models, electronic structure theory). Karaganda State University Scientific School. Retrieved from <https://soltustikkaz.kz/%D1%96%D1%80%D1%96-%D2%93%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%BC-%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%82%D1%82%D1%8B-%D2%B1%D0%B9%D1%8B%D0%BC%D0%B4%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8B%D1%80%D1%83%D1%88%D1%8B/>
4. Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. (n.d.). Scientific research on semiconductors and nanotechnologies (TopCon technologies applying the tunnel effect). Retrieved from <https://www.gov.kz/memleket/entities/science/press/news/details/1139346>
5. Al-Farabi Kazakh National University. (n.d.). Quantum physics and the laws of the microcosm [Educational materials]. Retrieved from <https://stud.kz/referat/show/67231>
6. Landau, L.D., & Lifshitz, E.M. (1977). \*Course of theoretical physics, Vol. 3: Quantum mechanics (Non-relativistic theory)\* (3rd ed.). Pergamon Press. (Original work published in Russian). See also: [https://en.wikipedia.org/wiki/Theoretical\\_Physics\\_\(Landau\\_and\\_Lifshitz\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Theoretical_Physics_(Landau_and_Lifshitz))