

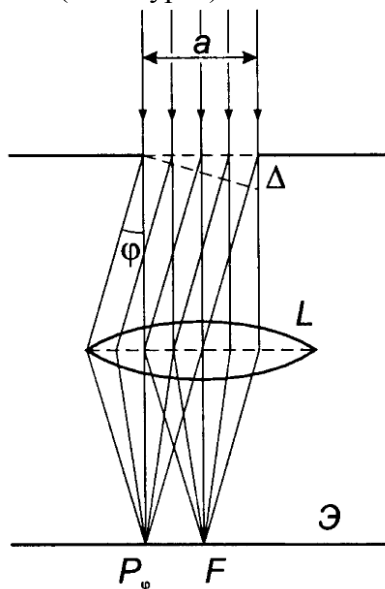
10. ЖАРЫҚТЫҢ ДИФРАКЦИЯ ҚҰБЫЛЫСЫН ЗЕРТТЕУ

10.1. Жұмыстың мақсаты

Әр түрлі типтегі дифракция суреттерімен танысу.

10.2. Қысқаша теориялық кіріспе

Жарық монохроматты толқынның саңылаудан өткен кездегі дифракциясын қарастырайық. Саңылау деп ені оның ұзындығынан өте кіші аз тік төртбұрышты тесікті айтамыз. Саңылаудың ені a болсын (10.1-сурет).



10.1-сурет. Саңылаудан өткен монохроматты толқынның сұлбасы

Толқын ұзындығы λ болатын жарық толқыны саңылау орналасқан жазықтыққа нормаль түсіп тұр. Саңылаудан кейін Э экранның фокалды жазықтығында L жинақтауыш линзасы орнатылған. Саңылау арқылы өткен параллель сәулелер шоғы бастапқы бағытынан оңға немесе солға әртүрлі бұрыштармен дифракцияланады. Дифракцияланған параллель сәуле шоқтарын линзада жинақталып, Э экранның белгілі нүктесіне түсіріледі.

Параллель сәулелер арқылы алынатын дифракциялық картина байқалатын дифракцияның түрі, параллель сәулелердегі дифракция немесе Фраунгофер дифракциясы деп аталады.

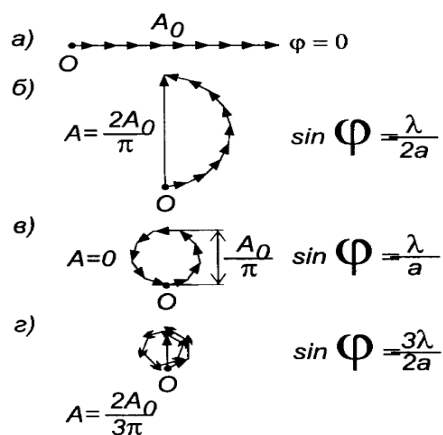
Э экрандағы жарық қарқынының φ дифракция бұрышына қатысты таралуын келесі формула бойынша есептеуге болады:

$$I_{\varphi} = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \quad (10.1)$$

Мұндағы, I_0 - дифракциялық картинаның ортасындағы жарықтың интенсивтілігі ($\varphi = 0$ бағытында). I - орналасу аймағы φ бұрышы арқылы анықталатын нүктедегі жарықтың интенсивтілігі. Дифракция бұрышы φ болған кезде төмендегі шарттар орындалады:

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi = k\lambda, \quad a \sin \varphi = k\lambda \quad (10.2)$$

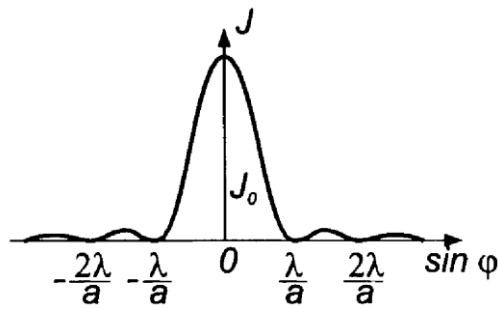
Мұндағы, $k = \pm 1, 2, 3, \dots$, жарықтың интенсивтілігі нөлге тең. Соңғы шарт пен сандық қатынасты саңылаудағы дифракция есебін амплитудаларды графиктік түрде қосу есебінің шешімі арқылы алуға болады. Толқындық беттің ашық бөлігін ені тар параллель жолақтарға бөлейік. Бұл жолақтардың әрқайсысын бірдей амплитудасы мен фазасы бірдей толқындар көзі ретінде қарастыруға болады.



10.2-сурет. Әртүрлі дифракция бұрышындағы φ нәтижелері.

Қорытынды амплитуданы әрбір жолақтың амплитудасын ұзындақтары өзара тең векторлар арқылы өрнектей отырып, амплитудаларды қосудың графикалық тәсілі арқылы табуға болады. Әртүрлі дифракция бұрышындағы φ нәтижелер 10.2-суретте келтірілген. $\varphi = 0$ болғанда (10.2a-сурет), L линза фокусында A_0 тербеліс амплитудасының мәні максимал болады. Шеткі жолақтардың фазаларының айырмашылығы π ($\Delta = \frac{\lambda}{2}$) болатын бағытта, қорытынды амплитуданың мәні $\frac{2A_0}{\pi}$ мәніне тең болады, себебі соңғы өрнектің мәні ұзындығы A_0 болатын жартылай шеңбердің диаметріне тең. Шеткі жолақтардың фазаларының айырмашылығы 2π ($\Delta = \lambda$) болатын бағытта, қорытынды амплитуданың мәні нөлге тең болады. Екі шеткі сәулелердің жол айырымының (Δ) мәні $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, k\lambda$ мәндеріне тең, яғни жарықталу минимумдары $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}, \frac{2\lambda}{a}$ бағытына сәйкес келген жағдайларда, амплитуда мәні нөлге тең болады. Мұндағы k -бүтін сан, себебі $\Delta = a \sin \varphi$.

Жарықталудың L линзаның фокалды жазықтығында таралуы 10.3-суретте көрсетілген. Орталық ақ жолақ (нөлдік реттегі максимум) жақын оң және сол минимумдардың арасындағы облысты қамтиды, яғни $\sin \varphi = -\frac{\lambda}{a}$ және $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}$ аралығындағы облыс. Жарықтың интенсивтілігі I_0 A_0 мәнінің квадраты арқылы анықталады. Келесі максимумдардың мәні орталық максимуммен салыстырғанда біршама кіші.



10.3-сурет. Жарықталудың L линзаның фокалды жазықтығында таралуы

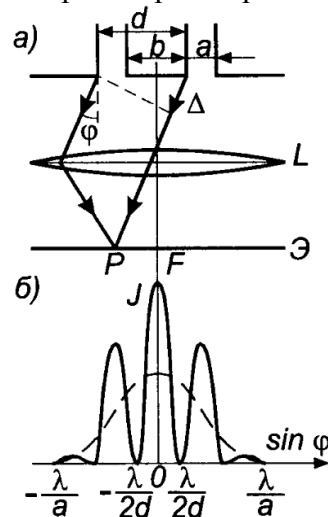
Расында, $\Delta = \frac{3}{2} \lambda$ болғанда, тербеліс амплитудасы $A_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_0}{\pi}$ (16.2г-сурет), ал

бірінші максимумның интенсивтілігі $I_1 = \left(\frac{2}{3\pi}\right)^2 I_0$ немесе $I_1 \cong 0,45 I_0$ мәніне тең

болады.

Қалған максимумдардың мәндері де осыған ұқсас анықталады. Есептеу жұмыстары, орталық және одан кейінгі максимумдардың интенсивтілігінің арақатынасы 1:0,045:0,016 және т.с.с. жалғасатынын көрсетеді.

Бір бірінен b қашықтықта орналасқан ендері бірдей a мәніне тең екі параллель саңылаудағы дифракцияны қарастырайық. Дифракциялық картина L линзасының фокалды жазықтығында бақыланады (10.3-сурет). Саңылауы бар экранға толқын ұзындығы λ болатын жазық монохроматты жарық түседі. Бір саңылаудағы дифракциялық максимумдар мен минимумдардың орналасу реті оның орнынан тәуелсіз дифракцияланған сәуелердің бағыты арқылы анықталады. Бұл саңылауды өзіне қатысты параллель қозғау дифракциялық картинаның өзгермейтіндігін көрсетеді. Демек, әр саңылаудан бақыланатын көріністер де бірдей болады.



10.4-сурет. L линзасының фокалды жазықтығындағы дифракциялық картинасының бейнесі

Қорытынды картинаны саңылаулардың әрқайсысынан шыққан суреттерді толқындардың интерференциясын есепке ала отырып қосу арқылы анықтауға болады. Жарықтың саңылауларын ешқайсысы жарық бермейтін бағыттарда екі параллель саңылау болған жағдайда да жарық болмайтыны анық. Бұл жағдайдағы интенсивтілік минимумының шарты $a \sin \varphi = k\lambda$, мұндағы $k = \pm 1, 2, 3, \dots$. Бұдан бөлек екі

саңылаудан шығатын толқындар бір бірін өшіретін бағыттар да болуы мүмкін. Қосымша минимумдар пайда болады. Олар екі саңылаудың белгілі нүктелерінен ($a + b$ қашықтыққа қалып тұрған) шыққан толқындардың жол айырымы $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots,$

$$\frac{2m+1}{2}\lambda \text{ болатын бағытта бақыланады. Мұндай бағыттар } \Delta(a+b)\sin\varphi = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

шарты арқылы анықталады (10.4-суретті қараңыз), мұндағы $m = \pm 0, 1, 2, 3, \dots$.

$\Delta(a+b)\sin\varphi = 0, \lambda, 2\lambda, \dots, m\lambda$ шарты арқылы анықталатын бағыттарда бір саңылаудың әрекеті екіншісінің әрекетін күшейтеді. Мұндағы $m = \pm 0, 1, 2, 3, \dots$. Бұл бағыттарға интенсивтіліктің максимумдары сәйкес келеді. Бірінші ретті минимумдар арасындағы қашықтық a саңылауының енінің мәнінен тәуелді болады. Егер $a \ll (a+b)$ болса, онда екі бірінші ретті минимумдардың арасында бірнеше минимумдар мен максимумдар орналасады. 10.4-б-суреттегі қисық екі параллель саңылаудағы дифракция кезіндегі жарық интенсивтілігінің таралуын көрсетеді.

Егер a саңылауының ені саңылау мен экран арасындағы қашықтықтан біршама кіші болса, Фраунгофер дифракциясы саңылау мен экран арасында линза жоқ болған жағдайда да байқалады (саңылауға түсетін толқын жазық болуы тиіс). Бұл жағдайда саңылау шетінен Р нүктесіне бағытталған сәулелер практика жүзінде параллель болады да, алдыңғы алынған барлық нәтижелер шынайы болып қалады.

Тәжірибеде дифракциялық сурет бойынша тар саңылаудан орталық максимум ені және жарық көзінің толқын ұзындықтарын біле отырып, саңылаулардың енін анықтауға болады. Дифракциялық сурет бойынша екі параллель тар саңылаудан жарық көзінің толқын ұзындықтары және әрбір саңылаудың енін біле отырып, олардың арасындағы қашықтықты анықтауға болады.

Көптеген жалпы жағдайларда дифракцияда бірдей енді a саңылаулар N жиынтығы және бір-бірінен b қашықтықта орналасқан дифракцияланған сәулелердің интенсивтілігі мына түрге келеді:

$$I_{\varphi} = I_0 \cdot \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta}\right)^2, \quad (10.3)$$

мұндағы $u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin\varphi, \delta = \frac{\pi b}{\lambda} \sin\varphi$.

(10.3) формуланы екі мүше түрінде көрсетуге болады. Бірінші мүше дифракциялық деп аталып, мына түрге келеді:

$$I_{\text{диф}} = I_0 \cdot \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2, \quad (10.4)$$

және мәні a -ға тең бір саңылаудың дифракциясын сипаттайды. Бұл функцияның түрі 10.3-суретте көрсетілгенмен сәйкес келеді. Ал, екінші мүше интерференциялық деп аталып, мынаған тең болады:

$$I_{\text{инт}} = \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta}\right)^2 \quad (10.5)$$

және әр түрлі саңылаулардан өткен сәулелердің интерференциясын сипаттайды.

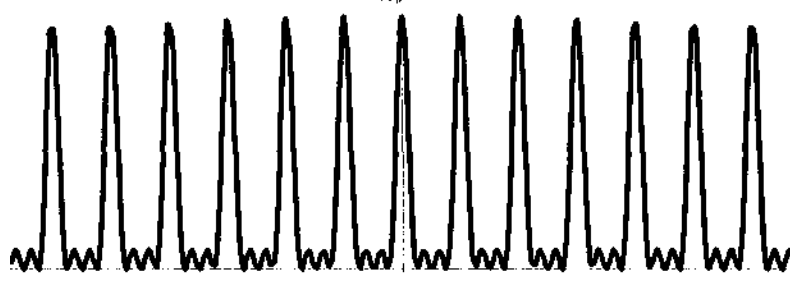
(10.5) формуласының алымы $\delta=0, n/N, 2\pi/N, (N-1)\pi/N, \pi, (N+1)\pi/N, \dots$, жағдайда 0-ге айналады, бірақ әрбір N -ші мән үшін $d = 0, \pi, 2\pi, \dots$ кезде және бөлімі де 0-ге айналады. Шекті өткелді пайдаланып, (10.5) функция бұрышының мәнін

табуға болады. Ол бірдей максимальды мәнге ие және N^2 тең. Олай болса, δ бұрышының интенсивтілігінің мәні максимум болады. Бұл максимумдардың арасында негізгі деп аталатын $(N - 1)$ қосымша минимумдар орналасады, ол (10.5) формуласының бөліміндегі нөлдік мәнге сәйкес келеді. Себебі, кез келген екі көрші қосымша минимумдар арасында қосымша максимум болады. Қосымша максимум интенсивтілігі жақын негізгі максимум интенсивтілігінен кіші, яғни қосымша максимумдардың саны $(N - 2)$ тең болады.

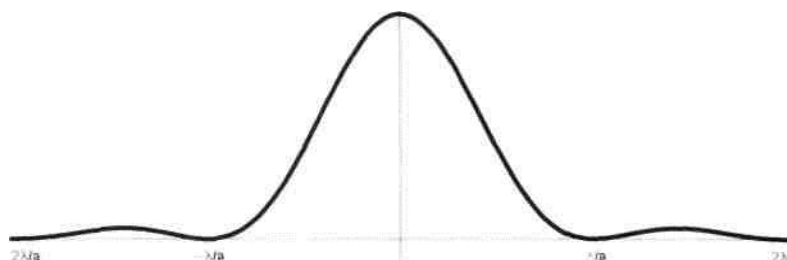
Саңылауы $N= 4$ болатын Фраунгофер дифракциясы кезіндегі интенсивтіліктердің орналасуы бойынша жазылған (10.5) функция түрі 10.5, в-суретте көрсетілген. Бұл графиктің сипаттамалық нүктелері мынадай болып табылады:

Негізгі дифракциялық минимумдар	$\sin\varphi = \lambda/b, 2\lambda/b, 3\lambda/b, \dots$
Қосылған интерференциялық минимумдар	$\sin\varphi = \lambda/Nd, 2\lambda/Nd, 3\lambda/Nd, (N-1)\lambda/Nd, (N+1)\lambda/Nd, \dots, (2N-1)\lambda/Nd, (2N+1)\lambda/Nd, \dots$
Негізгі интерференциялық максимумдар	$\sin\varphi = 0, \lambda/d, 2\lambda/d, 3\lambda/d, \dots$

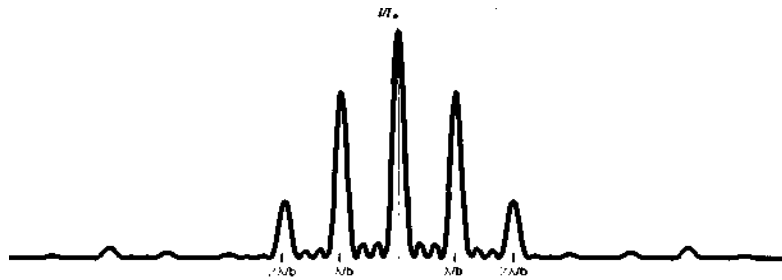
Осылайша экранда тордың дифракциялық картинасын алғаннан кейін бас максимумдардың арасында орналасқан қоспа минимумдар немесе максимумдардың санын анықтай отырып, тордағы саңылаулар санын анықтауға болады.



а)



б)



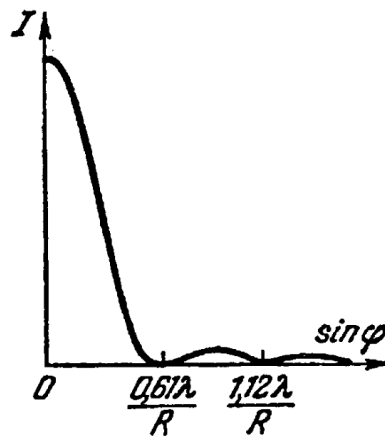
в)

10.5-сурет. Төрт саңылаудағы Фраунгофер дифракциясы
 а – интерференциялық құраушы (5), б – дифракциялық құраушы (4), в –
 дифракциялық картинаның жалпы көрінісі (3).

10.2.1. Дөңгелек саңылаудағы Фраунгофер дифракциясы

Бұл жағдайда дифракциялық картинада ақ және қара жолақтар кезектесіп орналасады. Интенсивтіліктің таралуы келесі функция арқылы анықталады.

$$I(u) \approx \left(\frac{2J_1(u)}{u} \right)^2.$$



10.6-сурет.

Минимумдар мен максимумдардың орналасу ретін математикалық тұрғыдан есептеу Бессель функциясының $J_1(u)$ түбірлерін анықтау арқылы есептелінеді:

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \varphi$$

Мұндағы, a – саңылаудың радиусы.

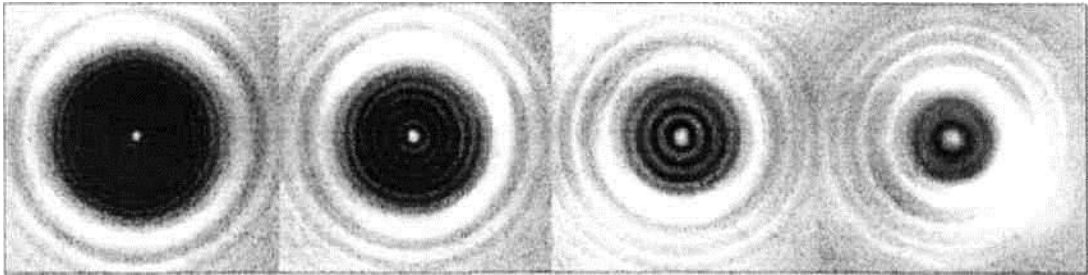
Максимумдар және минимумдардың орналасу реті келесі шарттарды қанағаттандырады:

$$\sin(\varphi) = \frac{k_m}{\lambda} m \lambda.$$

Мұндағы, $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ - максимум немесе минимум реті. $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ мәндеріне сәйкес келетін k_{\max} , k_{\min} және максимумдардың салыстырмалы интенсивтіліктерінің мәндері $I_{отн}$ төмендегі кестеде келтірілген.

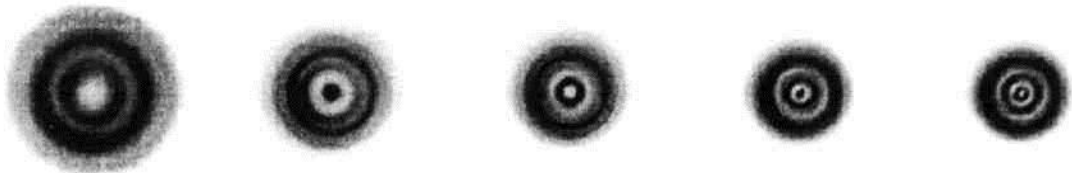
m	k_{\max}	$k_{\text{іді}}$	$I_{\text{іді}}$
1	0	0,61	1
2	0,41	0,56	0,0175
3	0,44	0,54	0,0042
4	0,46	0,53	0,0016

10.2.2. Дифракциялық картиналардың мысалдары



10.7-сурет. Пуассон дақтары

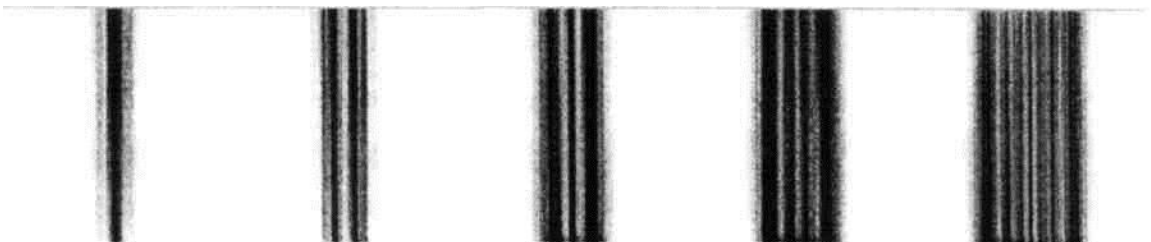
- Диаметрлері әртүрлі дискілердегі дифракция геометриялық көлеңкенің ортасында Пуассон дағы деп аталатын максимумның пайда болуына алып келеді.
- Дақтың диаметрі дискінің диаметрі кішірейген сайын ұлғайып, айқын көріне бастайды.



10.8-сурет. Дискінің диаметрі кішірейген кездегі дақтың диаметрінің көрінісі

10.2.3. Дөңгелек саңылаудағы Френель дифракциясы

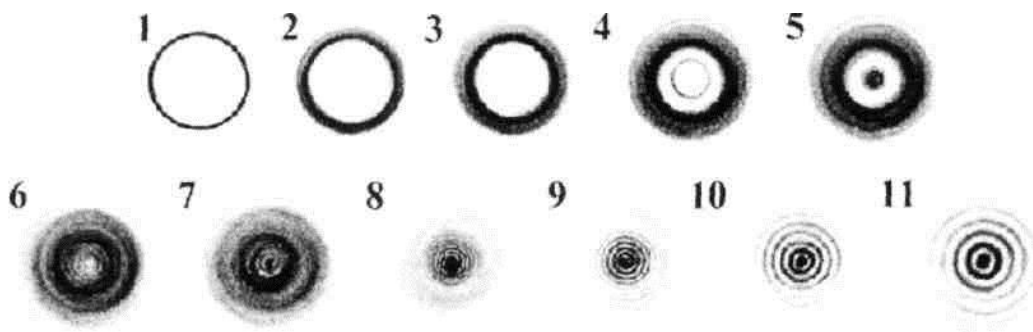
- Саңылауы бар экранға жақын аймақтағы дөңгелек саңылаудағы Френель дифракциясы;
- Ашық жартылай толқынды аймақтардың саны солдан оңға қарай 2-ден 6-ға өседі.
- Саңылау диаметріне жақындаған сайын картинаның өлшемі кішірейеді.



10.9-сурет. Саңылау диаметріне жақындаған сайын картинаның өлшемінің өзгерісі

10.2.4. Саңылаудағы Френель дифракциясы

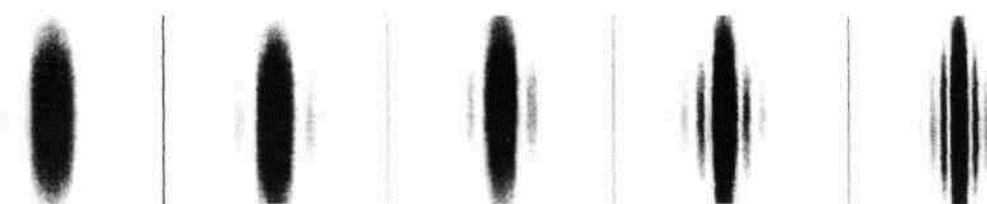
- Вертикаль орналасқан саңылау енінің кеңеюіне қатысты біртекті Френель дифракциясы.
- Бастапқы шамамен бір ашық жарты толқынды аймаққа, ал соңғысы бес ашық аймаққа сәйкес келеді.
- Картинаның вертикаль өлшемі саңылауға түсетін жарық шоғының диаметріне тәуелді.



10.10-сурет. Вертикаль орналасқан саңылау енінің кеңеюіне қатысты алынған кескіндер

10.2.5. Дифракциялық жақындату шекаралары

- Сақинадағы дифракцияның мысалы негізінде, геометриялық оптикадан (1-3) Френель дифракциясы (4-7) арқылы Фраунгофер дифракциясына (9-11) ауысуын бақылауға болады.
- Ашық зоналардың саны m солдан оңға қарай азайып отырады, сонымен қатар $m=1$ мәні 10.11-суретке сәйкес келеді.



10.11-сурет. Саңылаудың Фраунгофер дифракциясы

- Солдан оңға қарай кеңейтіліп отырған вертикаль саңылаудағы Фраунгофер дифракциясы.
- Нөлдік максимум айқын әрі шеткі максимумдардан екі есе кең.
- Дифракциялық жайылу облысының өлшемі саңылау еніне кері пропорционал.

Бақылау сұрақтары

1. Френель дифракциясы құбылысы нені білдіреді?
2. Фраунгофер дифракциясы құбылысы нені білдіреді?
3. Дифракциялық тор дегеніміз не?

Әдебиет

1. Полатбеков П.П. Оптика. –Алматы: Мектеп, 1981.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. изд. “Лань”. 2011.
3. Сивухин Д.В. Общей курс физики. том IV. Оптика. 2005.
4. Жуманов К.Б., Сарсембинов Ш.Ш. Оптика. -Алматы: Қазақ университеті, 2007.

