

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ**  
**Коммерциялық емес акционерлік қоғамы**  
**Ғумарбек Даукеев атындағы АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ**  
**БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ**

Кафедра: Телекоммуникациялық желілер және жүйелер

Мамандығы: 6М071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Қорғауға жіберіледі  
ТКЖЖ кафедра меңгерушісі  
PhD, доцент Темырканова Э.К.  
(ғылыми дәрежесі, атағы, аты-жөні)

\_\_\_\_\_

(қолы)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ**  
**түсіндірме жазба**

Тақырыбы: «Әр түрлі толқын ұзындығындағы оптикалық талшықтағы  
Мандельштам-Бриллюнн құбылысын зерттеу»

Магистрант: Мұратбек Н.Н. \_\_\_\_\_ группа МРЭТн-18-1  
(аты-жөні) (қолы)

Жетекшісі: к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ Жунусов К.Х.  
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні)

Пікір жазушы \_\_\_\_\_  
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні)

ЕТ қолдану кеңесшісі к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ Жунусов К.Х.  
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні)

Мөлшер бақылаушы: к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ Жунусов К.Х.  
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні)

Алматы 2020

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ  
МИНИСТРЛІГІ**  
**Коммерциялық емес акционерлік қоғамы**  
**Ғумарбек Даукеев атындағы АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ  
БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ**

Ғарыштық инженерия және телекоммуникациялар институты

Кафедра: Телекоммуникациялық желілер және жүйелер

Мамандығы: 6М071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған тапсырма**

Магистрант Мұратбек Назым Нұрланқызы

(аты-жөні)

Диссертацияның тақырыбы «Әр түрлі толқын ұзындығындағы  
оптикалық талшықтағы Мандельштам-Бриллюэн құбылысын зерттеу»

Университеттің Ғылыми кеңесімен № 122 бұйрығымен «25» қазан 2020 жылы бекітілген

Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі «25» мамыр 2020 ж.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты: әр түрлі толқын ұзындығындағы оптикалық талшықтағы Мандельштам-Бриллюэн құбылысын зерттеу.

Магистрлік диссертациялық сұрақтарда немесе мәселелерде баяндалатын мәселелер тізімі Магистрлік диссертацияның қысқаша мазмұны:

1. Бірмодалы оптикалық талшықтардағы бірнеше сәулелердің әсерлесуі нәтижесіндегі Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауын зерттеген ғылыми жұмыстарға шолу

2. Бірмодалы оптикалық талшықтардағы Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауының табалдырық қуатының өсу шарттарын әртүрлі толқын ұзындықтарында зерттеу

3. Қос толқынды бір бағытта жіберу арқылы МБЕШ эффектісін зерттеуге арналған тәжірибелік зерттеу

4. Тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерге негізделген 1310нм мен 1550нм толқындарын бір бағытта жіберудегі МБЕШ эффектісінің төмендеуін түсіндіретін математикалық моделге негізделген компьютерлік моделді құрастыру

Графикалық материалдардың тізімі (міндетті сызбаларды нақты көрсете отырып)

3.2 сурет - 1310нм және 1550нм толқын ұзындықтарында МБЕШ эффектісін зерттеу тәжірибелік құрылғысы

4.3 сурет - Оптикалық талшық бойына енген сәулелердің шартты түрде белгіленуі

4.4 сурет - Г.Агравал алған нәтижелер бойынша тура бағыттағы сәуле

толқындары мен стокстық толқындардың интенсивтіліктерінің өзгерулері

Ұсынылған негізгі әдебиеттер

1. Агравал Г., Нелинейная волоконная оптика.-М: Мир, 1966. -323с.
2. Булгакова С. А., Дмитриев А. Л. Нелинейно-оптические устройства обработки информации: учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, - 2009. – 56с.
3. Фотиади А.А., Кузин Е.А. Шумавые модуляции интенсивности рассеянного излучения при ВРМБ в одномодовом оптическом волокне в режиме сильного истощения накачки //ЖТФ. -1995. -Т. 65, вып. 7. С.195-199
4. Ерохин А.И., Олейников В.В., Путилин А.А. Структура спектра вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. -1995.–Т.61, №11. -С.873-878.

магистрлік диссертацияны дайындау  
КЕСТЕСІ

Бөлімдердің атауы, әзірленетін мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
1.Тақырыпқа сәйкес ақпараттық шолу	05.10.2018	
2.МБЕШ зерттеген ғылыми жұмыстарға шолу (теориялық бөлім)	14.01.2019	
3.Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауын әртүрлі толқын ұзындықтарында зерттеу (теориялық бөлім)	02.02.2020	
4. Қос толқынды бір бағытта жіберу арқылы МБЕШ эффектісін зерттеу (есептеу бөлімі)	18.04.2020	
5. Компьютерлік модельді зерттеу және талдау	10.05.2020	

Тапсырманың берілген уақыты 30 қыркүйек 2018ж

Кафедра меңгерушісі \_\_\_\_\_ (қолы) (Темырканова Э.К.) (аты-жөні.)

Ғылыми диссертация жетекшісі \_\_\_\_\_ (қолы) (Жунусов К.Х.) (аты-жөні.)

Тапсырма орындалуға қабылданды магистрант \_\_\_\_\_ (қолы) (Мұратбек Н.Н.) (аты-жөні.)

## **Аңдатпа**

Бұл диссертация әр түрлі толқын ұзындығындағы оптикалық талшықтағы Мандельштам-Бриллюэн құбылысын зерттеуге арналған.

Жұмыста МБЕШ әсерінен болатын бір модалы талшықты оптикалық байланыс желісінде әр түрлі толқын ұзындығындағы екі ортикалық сәуле көздері арқылы зерттеу жүргізу. Барлық магистралды талшықты оптикалық желілерде кіріс сигналдарының интенсивтілігі мен энергиясының жоғарғы жектері МБЕШ әсерінен болғандықтан, бұл құбылыстың әсерән төмендету әдістері іздестірілуде. Жұмыстың мақсаты осы құбылыстардың қандай жағдайлармен сыртқы әсерлерде қалай өзгеретіндігі туралы қосымша мәліметтер жинақтап, зерттеу нәтижелері бойынша тиісті тұжырым шығару.

## **Аннотация**

Данная диссертационная работа посвящена исследованию эффекта Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне на разных длинах волн.

В данной работе проведено исследование двух одномодовых оптоволоконных источников различной длины волны в одномодовой волоконно-оптической сети связи под воздействием ВРМБ. Поскольку интенсивность и энергия входных сигналов во всех магистральных волоконно-оптических сетях находятся под влиянием ВРМБ, в настоящее время ведется поиск путей уменьшения воздействия этого явления. Цель данной работы - собрать дополнительную информацию об условиях, в которых эти явления изменяются под воздействием внешних факторов, и сделать соответствующие выводы из результатов исследования.

## **Annotation**

This dissertation is devoted to the study of the Mandelstam-Brillouin effect in an optical fiber at different wavelengths.

In this work, we studied two single-mode fiber optic sources of different wavelengths in a single-mode fiber-optic communication network under the influence of MBSS. Since the intensity and energy of the input signals in all the main fiber-optic networks are influenced by MBSS, a search is currently under way for reducing the effect of this phenomenon. The purpose of this work is to collect additional information about the conditions under which these phenomena change under the influence of external factors, and draw appropriate conclusions from the results of the study.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	6
1 Бір модальды оптикалық талшықтардағы бірнеше сәулелердің әсерлесуі нәтижесіндегі Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауын зерттеген ғылыми жұмыстарға шолу	8
1.1 Негізгі ғылыми жұмыстарға талдау жасау	8
1.2 МБЕШ әсерін пайдалану арқылы жасалған құрылғылардағы негізгі үдерістері	13
1.3 Бір модальды оптикалық бейсызықтық әсерлер	14
1.4 Өлшеулер кезінде кездесуі мүмкін фазалық өздік модуляцияның әсерлері	16
1.5 Бейсызық қоссәуленің сынуына байланысты эффекттері	19
1.6 Бейсызықтық импульстер формасының өзгеруі	21
2 Бірмодальды оптикалық талшықтардағы Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауының табалдырық қуатының өсу шарттарын әртүрлі толқын ұзындықтарында зерттеу	23
2.1 Зерттеу барысындағы Мандельштам – Бриллюэн еріксіз шашырауының негізгі сипаттамалары, күшеюі және табалдырықтың алғы шарттары	23
2.2 МБЕШ табалдырығының сыртқы әсерлерге тәуелділігін анықтаудың әдістері	28
2.3 Сәулелену көзінің жіңішкеруі және күшеюдің қанығуы	31
2.4 МБЕШ эффектін анықтауға арналған математикалық модель негізі	33
2.5 МБЕШ табалдырық қуатын жоғарлату мәселесін зерттеу	34
3 Қос толқынды бір бағытта жіберу арқылы МБЕШ эффектін зерттеуге арналған тәжірибелік зерттеу	37
3.1 Зерттеу объектілері	37
3.2 Өлшеудің әдістемелері	40
3.3 Өлшеу нәтижелері	41
3.4 Зерттеу нәтижелерін талдау	53
4 Тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерге негізделген 1310нм мен 1550нм толқындарын бір бағытта жіберудегі МБЕШ эффектіннің төмендеуін түсіндіретін математикалық модельге негізделген компьютерлік модельді құрастыру	55
4.1 Математикалық модельдің негізінде тәжірибелік нәтижелерді тексеру	55
Қорытынды	65
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	67
А Қосымша	70
Б Қосымша	72
В Қосымша	73
Г Қосымша	74

## КІРІСПЕ

Қазіргі заманда талшықты оптикалық байланыс жүйесін пайдалану ауқымы барынша кеңейіп, магистралды желілермен қоса, әрбір абоненттің құрылғысына дейін жалғанған талшықтар арқылы ақпарат тарату мүмкіндігі күн сайын артуда. Осының салдарынан магистралды желілерде таратылатын ақпарат көлемі де күрт артуда. Бірақ, түрлі физикалық құбылыстардың әсерінен әрбір магистралды талшықты оптикалық желілердегі талшықтардың ақпарат тарату мүмкіндіктеері шектеулі болғандықтан, таратылатын ақпарат көлемі де шектеулі болып тұр. Бұл шектеулердің көпшілігі талшықтың физикалық қасиеттері мен химиялық құрылымына тікелей тәуелді. XX ғасырдың бас кезінде белгілі болған Мандельштам-Бриллюэн еріксізшашырауы (МБЕШ), Релэй шашырауы, Ми шашырауы, еріксіз комбинациялық шашыраулары (Раман шашырауы), Брэгг эффектісі сияқты құбылыстардың салдарынан жоғарыда аталған ақпаратты таратудағы шектеулер пайда болды. Сонымен қатар, осы құбылыстарды адамзат өз қажетіне дұрыс пайдалануының арқасында талшықтарда болатын сыртқы әсерлерді (сыртқы қысым деңгейі, температура әсері т.б.) тіркеуші құралдарды құрастыру мүмкіндігі пайда болды.

МБЕШ эффектісін пайдалана отырып, талшық бойында болған ақаулардың нақты орналасқан жерін анықтауға арналған сенсорлар бар. Қазіргі кезде қолданылатын барлық рефлектометрлер осы МБЕШ эффектісі арқылы тексеруші (зондтаушы) сигналды жіберу арқылы ақпарат сигналдарымен әсерлесуінің нәтижесінде ақау орнында МБЕШ кері шашырауының күшеюін тіркеу арқылы ақау орнын анықтайды.

Қазіргі заманғы технологиялардың жаңа серпілісі – DWDM технологиясы қолданысқа түбегейлі еніп, оптикалық талшық бойымен таратылатын ақпараттар ағынының тығыздығын арттыру мәселесі шешімдерін тапты. Алайда, ақпараттар ағынының тығыздығын МБЕШ әсерінен бір мода бойымен қажетті деңгейге дейін жоғарылату мүмкін болмай отыр. XX ғасырдың алпысыншы жылдары белгілі болған МБЕШ эффектісінің нақты әсері мен мәселелері осы ақпараттар ағынының тығыздығы күрт көбейген қазіргі заманда қайтадан жанданып көтерілуде. Себебі, қазіргі кездегі жетілдірілген оптикалық талшықтар бойымен бірнеше модальді лазерлік сәуле көздерін пайдалану арқылы ақпараттарды тарату мүмкіндігі туындап отыр. Осы уақытта МБЕШ табалдырығы мәселесін шешпей, ақпараттар ағынының тығыздығын тек экстенсивті түрде, талшықтардың санын көбейту арқылы ғана орап өтуде. Жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі - МБЕШ эффектісін зерттеу, МБЕШ табалдырығын анықтаудың жаңа әдісін ұсыну, МБЕШ эффектісінің модуляция жиілігіне тәуелділігін анықтау және алда тұрған мәселелерді шешу жолдарын іздестіру.

МБЕШ эффектісін зерттеуге арналған ғылыми еңбектерге әдебиеттік шолу жасаудың нәтижесінде жүзге жуық еңбектер қарастырылып, бірнеше негізгі бағыттары анықталды:

- оптикалық талшықтардағы бейсызықтық оптикалық құбылыстардың

арасынан МБЕШ эффектісін айыру жұмыстары;

- МБЕШ эффектісін пайдалана отырып, Бриллюэн сенсорларын, фильтрлерді жасау және оны қолдану ерекшеліктері;

- МБЕШ табалдырығын анықтаудың жаңа әдістерін ұсыну;

- сәуле көздерінің – лазерлердің, жарық диодтарының оптикалық ерекшеліктерінің әсерінен туындайтын МБЕШ эффектісін зерттеу;

- МБЕШ эффектілерін зерттеуге арналған математикалық модельдер құрастыру.

Жоғарыда аталған негізгі зерттеу бағыттарына ғылыми жұмысқа қатысы бар болғандықтан көбірек зейін бөлінді.

Оптикалық талшықтардың қасиеттерін зерттеуге бағытталған ғылыми жұмыстардың барлығында ғылыми зертханалардың негізгі құбылымы ұқсас. Оптикалық талшықтарға енген сәуленің, шыққан сәуленің және кері шағылған сәулелердің спектрлік, энергиялық және басқа да сипаттамаларын тіркеу арқылы, оларды салыстыру жұмыстарымен ұқсас болып келеді.

Бұл жұмыста МБЕШ әсерінен болатын құбылысқа әр-түрлі толқын ұзындықтарындағы екі оптикалық сәуле көздері арқылы зерттеу жүргізілді. Себебі, барлық магистралды талшықты оптикалық желілерде кіріс сигналдарының интенсивтілігі мен энергиясының жоғары шектері осы МБЕШ әсерінен болғандықтан, бұл құбылыстың әсерін төмендету әдістері іздестірілуде. Аталған жұмыстың негізгі мақсаты осы құбылыстың қандай жағдайлар мен сыртқы әсерлерде қалай өзгертіндігі туралы қосымша мәліметтер жинақтап, зерттеу нәтижелері бойынша тиісті тұжырым шығару болып табылады.

Жұмыстың мақсаты:

Әр-түрлі толқын ұзындықтары арқылы Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауын зерттеу.

Зерттеу барысында төмендегідей мәселелерді шешу қажет:

1. Аталған ғылыми жұмыстың тақырыбына сәйкес келетін негізгі ғылыми жұмыстарға шолу жасау;

2. Бір модалы оптикалық талшықтардағы бірнеше жиіліктегі толқындардың бір-бірімен әсерлесу ерекшеліктерін зерттеу;

3. Әр-түрлі толқын ұзындықтарында жекелей және бірлесіп толқын жолдан өткен және шағылысқан кездеіндегі импульстардың энергиясын өлшеу және тіркелген энергиялар мәндерінің модуляция жиілігіне тәуелділігін анықтау арқылы МБЕШ зерттейтін тәжірибелік зерттеулер ұйымдастыру;

4. Тәжірибелік зерттеулерден алынған нәтижелерді математикалық модель құрастыру арқылы салыстыра отырып, МБЕШ эффектісін анықтаудың жаңа әдісін ұсыну.

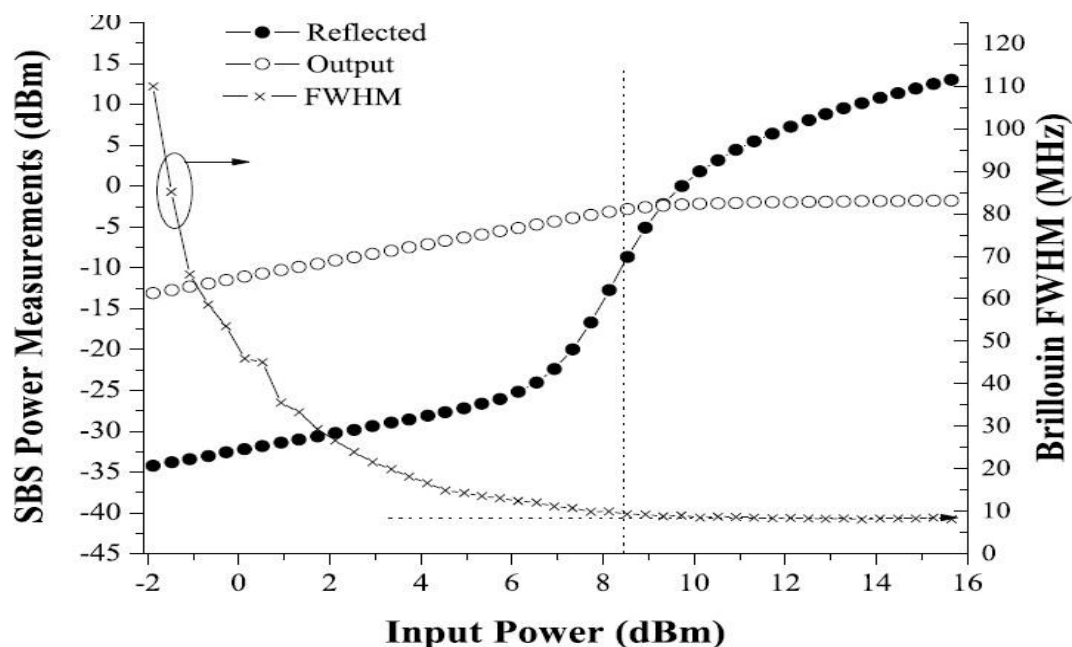
## **1 Бір модалы оптикалық талшықтардағы бірнеше сәулелердің**

# әсерлесуі нәтижесіндегі Мандельштам- Бриллюэн еріксіз шашырауын зерттеген ғылыми жұмыстарға шолу

## 1.1 Негізгі ғылыми жұмыстарға талдау жасау

Оптикалық талшықтарды зерттеу кезінде, оның ішінде өте ұзын толқынжолдарды зерттеуде бейсызық эффектілердің көптеген түрлерінің үлестері пайда бола бастайды. Олардың ішінен МБЕШ эффектісін айырып алу, оны зерттеу жұмыстары ерекше дамыған. МБЕШ эффектілерін зерттеуге арналған ғылыми жұмыстардың ерекшелігі ретінде жоғарыда аталған толқын энергиялары мен спектрлік сипаттамаларын зерттеу негіздерін атауға болады. Қазақстан Республикасы аймағындағы магистралды оптикалық толқынжолдардағы бейсызық эффектілердің байқалуы, тіркелуі және оларды жою жұмыстарының ішінде МБЕШ эффектісін тіркеу және оларды тиімді пайдалануда МБЕШ эффектісіне негізделген «рефлектометр» құрылғылары кеңінен пайдаланылады. Қала ішіндегі ғимараттарда таратылатын оптикалық толқынжолдардағы бейсызық эффектілерге карағанда магистралды толқынжолдардағы бейсызық эффектілердің үлес түрлері, оның ішінде МБЕШ эффектісі бірінші кезекте ескеріліп, 1310 нм үшін сәуле көзінің тарату энергиясының максимум мәні – 15 дБ, ал 1550 нм үшін – 27 дБ мәндерінде алдын-ала шектеліп, МБЕШ эффектісінен қорғалады.

МБЕШ табалдырығын тәжірибелік түрде толқынжолдан өткен және кері шағылған сәуле энергиясын тіркеу арқылы анықтайды (сурет 1.1).

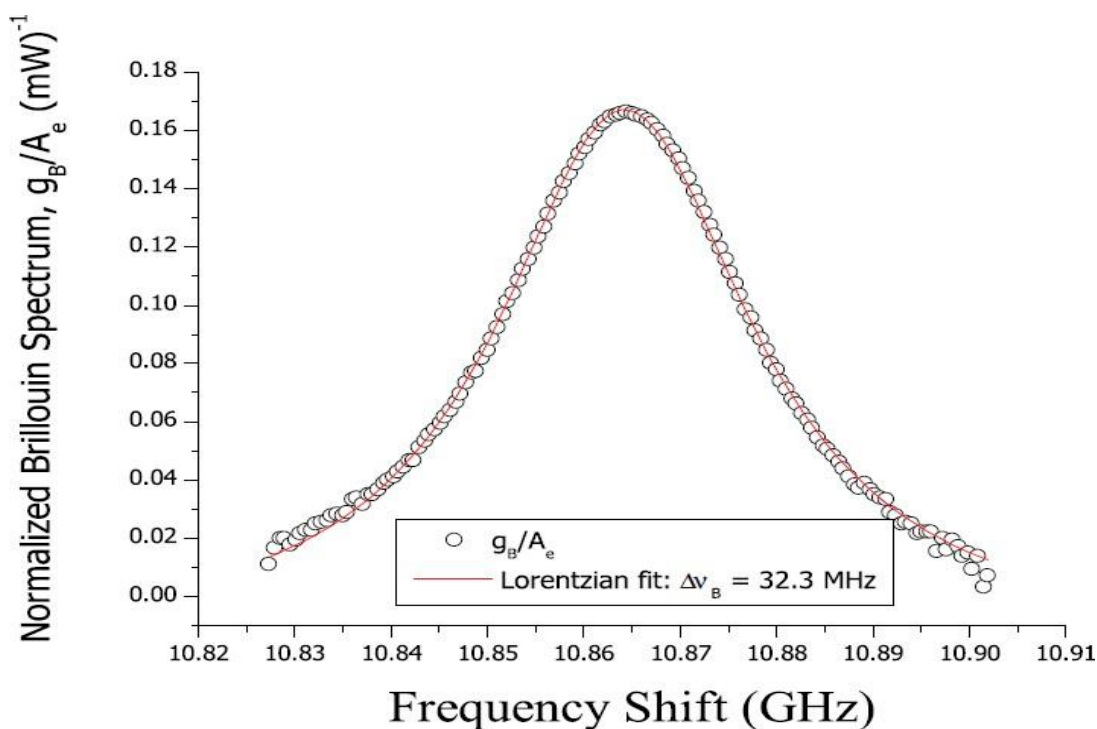


Сурет 1.1- МБЕШ табалдырығын тәжірибелік түрде анықтау.

Алайда, соңғы жылдардағы технологияның қарқынды дамуының

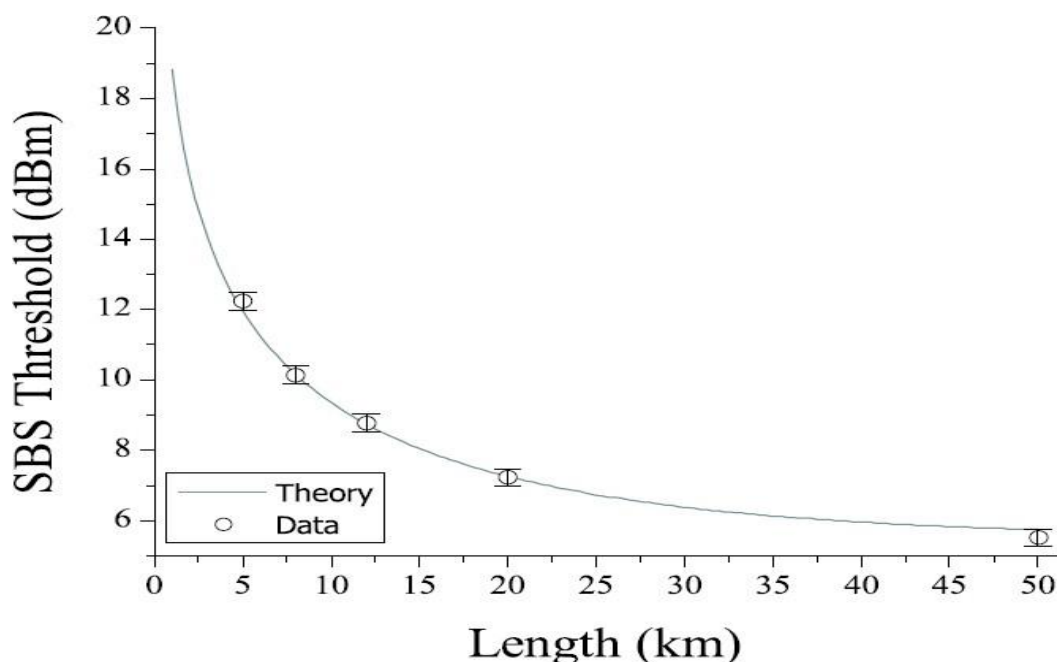


арқасында, оптикалық толқынжолдың физикалық және химиялық қасиеттерін арттыру жұмыстарының көбеюі нәтижесінде МБЕШ эффектісін әр түрлі химиялық қоспалардан құралған толқынжолдардың сипаттамаларын ескеріп зерттейтін ғылыми жұмыстарды артуда. Von A.Ruffin өз еңбегінде [4] 1550 нм толқын ұзындығында энергиясын 15-27 дБ аралығында өзгертіп, сәуле көзін 50 км дейінгі ұзындықтардағы оптикалық талшықтардың қасиеттеріне зерттеу жүргізген. Түскен сәуле мен кері шағылған сәуле арасындағы айырмашылық 10 ГГц болады (сурет 1.2).



Сурет 1.2-Түскен сәуле мен кері шағылған сәуле арасындағы айырмашылық

Von A.Ruffin [4, p.27] қасиеттері үш түрлі оптикалық талшықтарға зерттеу жүргізіп, МБЕШ эффектілерінің 15 дБ-ден бастау алатындығын тіркейді. Толқынжолға тура бағытталған сәуле мен кері шағылған сәуле арасындағы ығысу жиілігі 10 ГГц мәнінде тіркелген (сурет 1.3). Ол тәжірибені ұзындығы 5, 8, 10, 20 және 50 км талшықтар үшін жүргізіп, теориямен сәйкестігін тексерген (сурет 1.3).



Сурет 1.3- Ұзындығы 5, 8, 10, 20 және 50 км талшықтарға жүрзілген тәжірибе нәтижелері

Авторлар аналитикалық модельде +z тура бағыттағы сәуле толқындары, -z стокстық толқындар таралады деп есептеп, стокстық фотондардың спектрлік тығыздығының  $N_s$  дифференциалдық теңдеуін төмендегідей түрде көрсетеді:

$$\left(\frac{d}{dz} - a\right) N_s(z, \nu_s) = -\frac{1}{A} [g(\nu) \otimes P_p(z, \nu_s)]_{\nu_s} * (N_s(z, \nu_s) + 1) \quad (1.1)$$

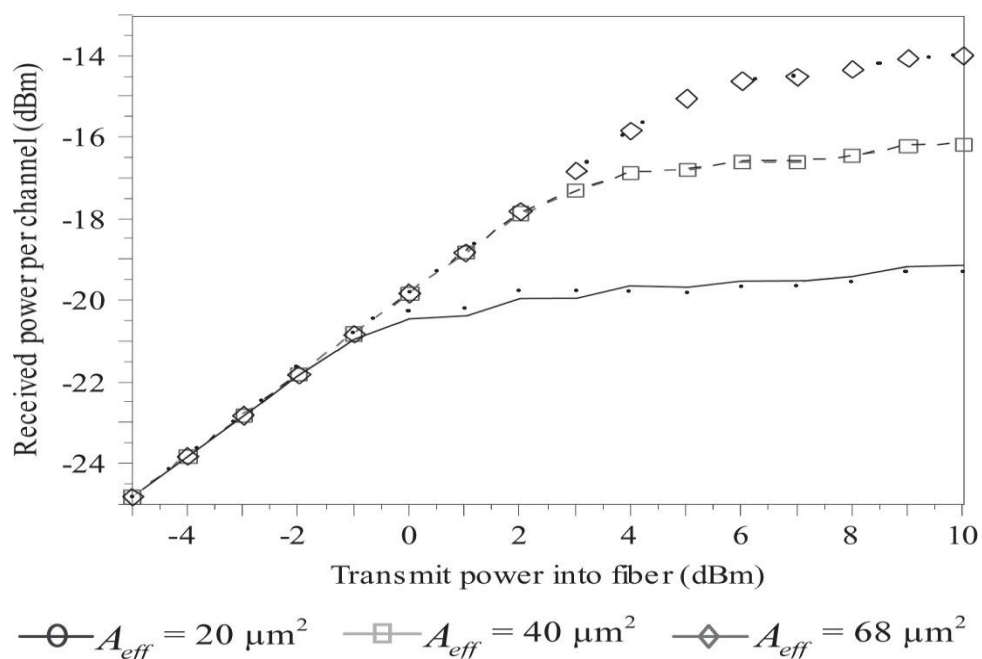
мұндағы,  $P_p(z, \nu_s)$  - тура бағыттағы сәуле толқындарының спектрлік тығыздығы,

$g(\nu)$  - МБЕШ эффектiсiнiң күшею коэффициентi,

$\otimes$  - белгiсi спектрлiк функциялардың интегралдық ұйытқуын бiлдiредi.

Заманға сай талшықты оптикалық байланыс жолының даму барысында оптикалық технологиялардың қолданылуына байланысты бейсызықтық жарықтың керi шағылу мәселелерi пайда болды. Сәйкесiнше, МБЕШ және МКШ құбылыстары, оптикалық сигналдың керi шағылуына байланысты, оптикалық байланыс технологиялары да кеңiнен зерттелуде [6].

CDMA ақпараттар тарату жүйесiнде МБЕШ бейсызықтық эффектiсiн талдау жұмысында Фуад Хатим [25] байланысқан модалар әдiсiн қолдана отырып, оптикалық талшықтың әртүрлi көлденең қимасының аудандарында МБЕШ бейсызықтық эффектiсi өзгерiсiнiң тәуелдiлiк заңдылығын тәжірибелiк жұмыстар арқылы зерттеп, төмендегiдей (сурет 1.4) нәтижелер алған.



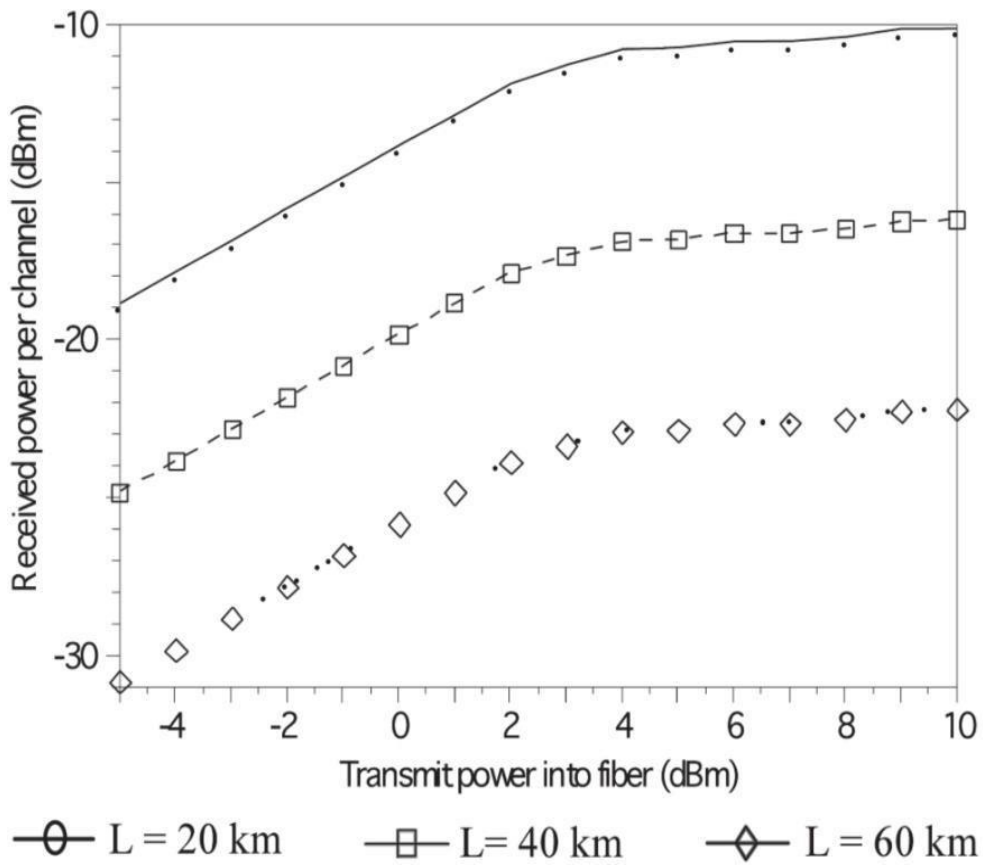
Сурет 1.4- Кіріс және шығыс толқындар қуаттарының арасындағы бейсызықтық үдеріс

Жоғарыдағы суретте көрсетілгендей, оптикалық талшықтың көлденең қимасының ауданы артқан сайын бейсызықтық эффектінің әсері азаяды. Қарастырылған жұмыстағы бейсызықтық эффектілердің МБЕШ-дан басқа ФӨМ үлесі бар екендігін аңғаруға болады. Сонымен қатар, авторлар бейсызық эффектілердің талшық ұзындығына байланысты өзгертіндігін тіркеген. Бұл жұмыста қарастырылып отырған жұмысқа ұқсас нәтижелер алған (сурет 1.5).

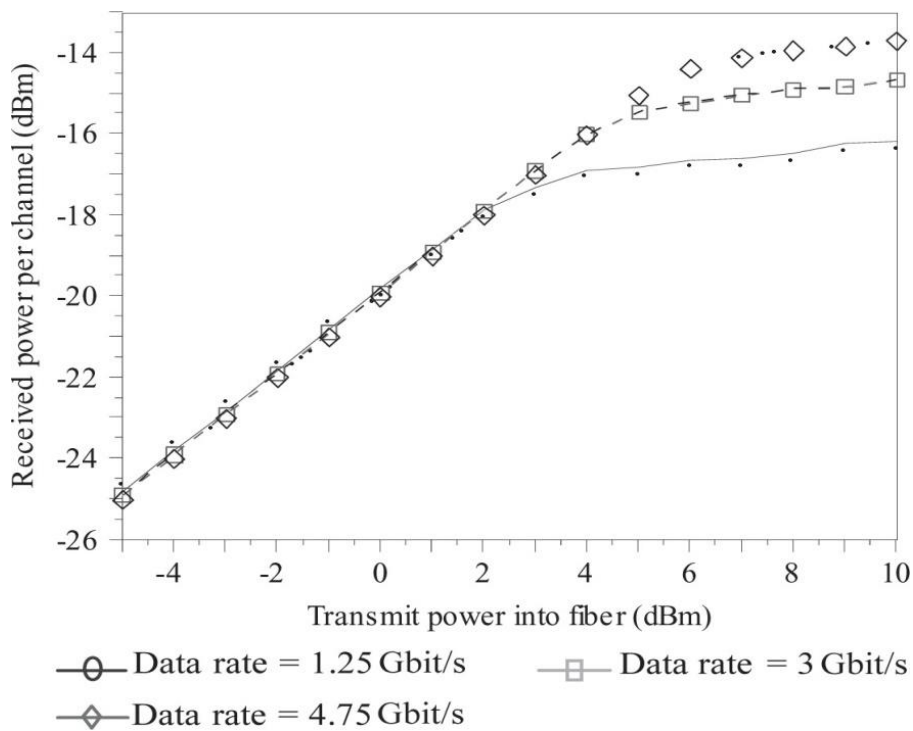
Фуад Хатим өз жұмысында бейсызық эффектілердің ақпараттардың таралу тығыздығына (импульстардың тығыздығына) тәуелділік заңдылығын да қарастырған (Сурет 1.5).

Автордың алған нәтижелері ерекшеленеді (сурет 1.5). Себебі, ақпараттар ағынының тығыздығы артқан сайын бейсызықтық үдерістердің әсері төмендеген. Автор алған нәтижелерін түсіндіру үшін математикалық модельдің негізіне байланысқан модалар әдісін таңдаса да, оның шешімін компьютерлік Симулинк моделімен түсіндіруге тырысқан.

МБЕШ эффектісін қолдана отырып, температураның және қысымның өзгерістерін тіркеуге арналған сенсорларды құрастыру және олардың спектрлік сипаттамаларын зерттеуге арналған жұмыстар кеңінен қарастырылды.



Сурет 1.5- Кіріс және шығыс толқындар қуаттарының арасындағы бейсызық үдерісті тіркеу



Сурет 1.5- Кіріс және шығыс толқындар қуаттарының арасындағы бейсызықтық үдеріс нәтижелері

Талипов А.А. Кузнецов В.А., Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. [26, 27] өз еңбектерінде МБЕШ эффектiсiн қолдана отырып, температураны және қысымдық кернеудi өлшеуге арналған сенсордың математикалық моделiн ұсынған:

$$K_{B,T} = \frac{dv_a}{dT} = \left( \frac{2}{\lambda_1} V_a \frac{dn_1}{dT} + n_1 \frac{dV_a}{dT} \right) \quad (1.2)$$

$$K_{B,\varepsilon} = \frac{dv_a}{d\varepsilon} = \left( \frac{2}{\lambda_1} V_a \frac{dn_1}{d\varepsilon} + n_1 \frac{dV_a}{d\varepsilon} \right) \quad (1.3)$$

мұндағы, (1.2) – толқын жиiлiгiнiң температураға тәуелдiлiгi, ал (1.3) – толқын жиiлiгiнiң қысым кернеуiне тәуелдiлiгi. Осы теңдеулердiң шешiмдерiн компьютерлiк модельдеу арқылы анықтаған. [28] бiр-бiрiне тәуелсiз екi түрлi жиiлiкте жұмыс жасайтын сәуле көздерi арқылы көп модалы оптикалық талшық бойымен бiрмезгiлде жiберу арқылы зерттеулер жүргiзген. Спектрлiк тәуелсiздiкке қарамастан стокс сәулесiнiң нәтижесiндегi интенсивтiлiк шамамен бiрдей болатынын көрсеткен.

## **1.2 МБЕШ әсерiн пайдалану арқылы жасалған құрылғылардағы негiзгi үдерiстер**

МБЕШ эффектiсiн талшықты оптикалық байланыс жолдарында қолдану. Оптикалық ссулеленудiң шағылудың таралуы кезiнде оптикалық талшықта пайда болатын сызықтық емес әсерлерiнiң iшiнде Мандельштам-Бриллюэн ерiксiз шашырауы ерекше орын алады. Бұл талшықтағы ең төмен шектi сызықтық емес әсер – стандартты бiр модалы талшық үшiн бiр километр талшық ұзындығы есебiнде МБЕШ шегi ~ 10мВт құрайды. Ол, сонымен қатар, ең жiңiшке жолақты сызықтық емес үдерiс болып табылады. Бриллюэн күшейтуiнiң жолақ енi бар-жоғы ~ 35 МГц құрайды, бұл оның оптикалық-талшықты жүйеде пайдалануын қажетсiз етедi, бiрақ оның негiзiнде оптикалық спектранализаторлар жасауға мүмкiндiк жасайды. МБЕШ қарама-қарсы сипаты процесстiң спецификалық кеңiстiктiк-уақыттық динамикасына әкеледi, ол оптикалық сигналдардың уақыттық формасын бақылауға қажет (мысалы, импульстар комперссиясы), сонымен қатар, соңғы жылдары кең тараған қысымды тарату сенсорларында пайдаланылады. Мұндай сенсорлар көпiрлер, эстакадалар, құбыр өткiзгiштердiң дiңгектерiне құрылыс кезiнде салынатын және кейiннен пайдалану кезiнде таратылған кернеуге мониторинг жасалатын қарапайым кварц талшықтары ретiнде қолданылады.

Мандельшам-Бриллюэн ерiксiз шашырауы ортаның акустикалық тербелiстерiнде болады және өте төмен спектрлiк күшеюге ие. МБЕШ табалдарығына тең шығу қуатында жарықтың керi бағытта интенсивтi таралуы басталуы мүмкiн, ал бұл байланыстың дeградациясына әкеледi.

МБЕШ табалдырығы оптикалық байланыс жүйесiнде айтарлықтай төмен болғандықтан ( $\alpha \approx 0,2$ ) Дб/км жоғалтуларымен талшықта ~ 1 мВт), МБЕШ мұндай жүйеде қалай әрекет ететiнiн бiлген жөн. МБЕШ байланыс

жүйесінде күшейту үшін пайдаланылады, бірақ ол паразитті болуы да мүмкін.

Мұндай жеңілдетілген талдаудың нәтижесі күтілмеген, өйткені МБЕШ табалдырығы АМ және ФМ үшін модуляция жиілігіне тәуелсіз 2-4 есеге ғана артады. ФМ үшін МБЕШ-күшеюі В ақпарат тарату жылдамдығының артуына байланысты төмендейді:

$$g_B^{\text{ФМ}} \approx \frac{\Delta v_B}{B+v_B} g_B^{\text{непр}} \quad (1.4)$$

Сәйкесінше табалдырық уатты тарату жылдамдығының артуымен сызықты түрде көбеюі керек. МБЕШ табалдырығы  $V \square 1$  Гбит/с тарату жылдамдықтарына біршама өсуі көрінеді. Мұндай жоғары тарату жылдамдығында тіптен АМ және ФМ үшін табалдырықтық қуат едәуір артуы мүмкін, ол тікелей модуляция кезіндегі жартылайөткізгіш лазерлерінің спектрлік кеңеюі нәтижесінде болады. Модуляцияның біртексіздігі де табалдырықтық қуатты арттыруы мүмкін, мұны эксперименталды түрде жиілік модуляциясы жағдайында байқауға болады. Сонымен, қуат 10 мВт дейін талшыққа МБЕШ туындайтын жүйе сипаттарын нашарлатпай енгізілуі мүмкін.

Жоғарыдағы талдаулар бірарналы байланыс жүйесіне қатысты. Егер көпарналы жүйе болса әр арнаның қуаты МБЕШ табалдырығынан төмен болуы тиіс. Бірақ, көпарналы жүйеде МБЕШ арна аралық қиылыстық ақауларға әкелуі мүмкін, бұл жағдай байланыс 2 бағытта жүргізілсе және қарама-қарсы бағыттардың шағылу жиіліктерінің айырмашылығы МБЕШ жылжу шамасын жақындап келсе ( $\vartheta \approx 11$  ГГц толқын ұзындығы 1550 нм).

### **1.3 Бір модальды оптикалық талшық негізімен байланысты бейсызықтық әсерлер**

Ғылыми жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі - оптикалық талшық бойында сәулелердің өзара әсерлесуінің нәтижесінде, сонымен қатар, жекелей сәуленің параметрлерін (қуаты мен импульстық сигналдардың модуляция жиілігі және т.б.) зерттеу үдерістерінде бейсызықтық эффектілерді зерттеу және оларды бір-бірінен ажырата білу болып табылады. Сондықтан, жұмытың алғашқы тарауында талшық бойындағы сәуле қуатының өзгерісіне байланысты спектрлік сипаттамалар, атап айтқанда, спектр енінің өзгеруінің салдарынан пайда болатын бейсызықтық үдеріс – фазалық өздік модуляция құбылысының негізгі сипаттамалары баяндалады [3, с.24]. Егер бір модальды оптикалық талшық бойына екі немесе одан да көп жиіліктердегі сәулелерді жіберу арқылы ақпарат таратылса, осы сәулелердің өзара әсерлесуінің арқасында болатын бейсызықтық үдерісі – фазалық кросс модуляция эффектісі де қарастырылады. Оптикалық талшық бойында жоғары энергияларда пайда болатын еріксіз комбинациялық шашыраудың негізгі сипаттамалары беріледі. Сонымен қатар, ТОВЖ үздіксіз және сенімді жұмыс істеуіне бағытталған барлық іс-шаралар Қазақстан Республикасының заңдары мен актілеріне [35] және Халықаралық ұсыныстар мен ережелеріне қатаң түрде сәйкес.

Бейсызықты эффектілер жоғары қуатты жарықта пайда болатыны [1, 2]

белгілі. Әдістемелік нұсқаулықтарға [35] сәйкес бастапқыда оптикалық талшыққа енгізілген сәуленің қуаты 17 дБм ( $\lambda = 1550$  нм) шектелген, кейіннен ол 19 дБм дейін көтерілген. Қазіргі заманға сай бірнеше компаниялардың ұсынуымен (Siemens, Tусо) қуат деңгейі 30 дБм дейін артқан DWDM жүйелері енгізілді.

Оптикалық талшықтың зақымдану орнын және пайда болу себебін анықтау авторлар зерттеген, сонымен қатар МБЕШ үдірісін пайдалану арқылы да зақымдану орнын анықтау қарастырылуда.

Конденсацияланған ортаның (қатты және сұйық орта) өздік серпімді тербелісімен түскен оптикалық сәуленің өзара әсерлесуі нәтижесінде сәуленің шашырауын Мандельштам-Бриллюэн шашырауы деп атайды. Сәуленің конденсацияланған орта бөлшектерімен салыстырмалы түрде күшті әсерлесуі нәтижесінде ортада барлық бағытта таралатын серпімді тербеліс толқындары туындайды (гипердыбыс). Осындай толқындардың бір-біріне қосылуының нәтижесінде орта тығыздығының флукуациясы пайда болып, ортаның сыну көрсеткіші өзгереді. Осы әртүрлі тығыздықтарға шағылған сәуле шашырауға ұшырайды [23-24].

Жарықтың комбинациялық шашырауы дегеніміз белгілі бір затқа түскен жарықтың сол заттан толқын ұзындығы өзгере отырып шашырауы. Егер түскен сәуленің спектрі сызықты өзгерсе, онда жарықтың комбинациялық шашырауы кезінде шашыраған сәуленің спектрінде қосымша сызықтар пайда болады. Бұл өз кезегінде заттың молекулалық құрылымына тәуелді құбылыс. Пайда болған жарықтың жаңа сызықтары жиіліктерінің комбинациясы түскен сәуленің жиілігін құрайды.

Оптикалық талшықта жоғалту қабілеті төмен бір модальды оптикалық талшықтық байланыстың алыс арақашықтықтағы кең жолақты жүйесінің негізі болып табылады. Бұндай талшықтың өзегінің диаметрі (2а) көп модальды оптикалық талшықтарға қарағанда біршама аз болады және 5-8 мкм құрайды (толқынның жұмыс ұзындығына байланысты). Бір модальды оптикалық талшықтың жартылай өткізгіші оптикалық сәулелермен жұмыс жасайды, олардың кііру қуаты ( $P_{кір}$ ) көп модальды оптикалық талшықты қолданатын жарық өткізгіштен жоғары болады. Сондықтан, бір модальды оптикалық талшық кварцтың бейсызықты поляризациясының пайда болуына жағдайлар туындайды. Р диэлектрик поляризациялануы әлсіз Е электр өрісінің кернеулігіне пропорционал болады. Оптикалық талшық өзегінің өріс өзгерісіне байланысты, оптикалық сәулемен жұмыс жасау барысында поляризациялану Е бейсызықтыққа тәуелді болады:

$$P = x^{(1)}E + x^{(2)}E + x^{(3)}E + x^{(4)}E + x^{(5)}E + \dots \quad (1.5)$$

Сонымен, МКШ-да МБЕШ-да Сызықтық емес әсерлер ұзақ оптикалық талшықтағы қажет емес әсерлердің бірі болып табылады. Оларды азайту үшін қосылатын қуатты азайту немесе талшықтың өзек диаметрін үлкейту қажет. Бір модальды оптикалық талшықтар нормаланған жиілікте жұмыс жасайды:

$$V < 2,405 \quad (1.6)$$

$V$  нормаланған жиілік  $2a$  өзек диаметрімен,  $\lambda$  толқын ұзындығымен және толқынның сандық апертурасымен анықталады:

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.7)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

мұндағы,  $n_1, n_2$  - өзектің сыну көрсеткішінің және жарықты кері тарататын қабығының мәні. Сондықтан бір модалы режимді сақтай отырып, өзек диаметрін  $2a$  ұлғайтуды, сыну көрсеткішін белгілі бір профильдегі талшықты жасай отырып қолжеткізуге болады.

#### 1.4 Өлшеулер кезінде кездесуі мүмкін фазалық өздік модуляцияның әсерлері

Қарастырылатын жұмыста өлшенген параметрлердің – әртүрлі ұзындықтардағы оптикалық талшық бойына енген, өткен және кері шағылған сәулелердің қуаттарын өлшеу кезінде байқалатын бейсызықтық үдерістің табиғатын тану үшін, тәжірибелік жұмыстарды ұйымдастыру кезінде жарықтың спектрлік пішіндері өзгерісін тіркейтін құрылғылардың болуы қажет еді. Алайда мұндай қажеттіліктің бар екендігін тәжірибелік жұмыс аяқталғаннан соң түсінгендіктен, зертханалық жұмыстар кезінде спектрлік пішіндердің өзгерісі тіркеуге алынбады. Себебі ғылыми жұмыстарға шолу жасау кезінде [2, 20-б] ұзын талшықта МБЕШ эффектiсiнен бұрын фазалық өздік модуляция (ФӨМ) эффектiсiнiң әсерiнен бейсызықтық жоғалтулардың тіркелгендігі баяндалады. Сондықтан, осы бейсызықтық эффектi туралы қысқаша мағлұматты Г.Агравалдың еңбектері арқылы [1, с.17] келтіру қажет деп саналды.

ФӨМ - сынудың көрсеткішінің интенсивтілікке тәуелділік нәтижесінде туындайтын сызықтық әсер, яғни оптикалық импульстардың спектралды кеңеюіне әкелетін құбылыс болып табылады. ФӨМ оптикалық талшықтықта тарайтын оптикалық өрісті өзіндік бағытталаатын фазалардың енуімен сипатталады. Оның шамасын оптикалық өріс фазасы өзгеріп тұратынын ескере отырып анықтауға болады:

$$\phi = (n + n_2 |E|^2)k_0 L \quad (1.8)$$

мұндағы,  $k=2\pi/\lambda$  және  $L$ - оптикалық талшықтың ұзындығы.

ФӨМ нәтижесінде интенсивтілікке тәуелді фазалардың енуі пайда болады. ФӨМ қысқа импульстардың спектралдық кеңеюіне әкеледі және



оптикалық талшықтың топтық жылдамдықтарының аномалдық дисперсия ауданындағы оптикалық солитондардың болуына ықпал етеді.

Оптикалық талшықта ФӨМ құбылысын толық сипаттау таралудың жалпы теңдеуін есептік шешуді қажет етеді. Шешім келесі түрде болады:

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[i\phi_{NL}(z, T)] \quad (1.9)$$

мұндағы,  $U(0, T)$  өріс амплитудасы  $z=0$  және

$$\phi_{NL}(z, T) = |U(0, T)|^2 \left( \frac{z_{\text{эфф}}}{L_{NL}} \right), \quad (1.10)$$

$$z_{\text{эфф}} = \frac{1}{a} [1 - \exp(-az)]$$

мұндағы,  $L_{NL}$  - бейсысықтық тиімді таралу ұзындығы ретінде физикалық мағынаға ие, онда  $\phi_{\text{max}}$  шамасы 1 тең. Сонымен, ФӨМ интенсивтілікке тәуелді фазалардың енуін тудырады, бірақ импульс формуласы өзгеріссіз қалады,  $\phi_{NL}(z, T)$  уақытқа тәуелділігінің нәтижесінде ФӨМ әсерінен спектрдің кеңеюі пайда болады, өйткені, импульс фазасының уақыттағы өзгеруі дегеніміз оптикалық жиіліктің  $\omega_0$  негізгі жиіліктен бірден өзгеруі болып табылады. Жиіліктің өзгеруі келесі теңдеумен анықталынады:

$$\delta w(T) = -\frac{\partial \phi_{NL}}{\partial T} = -\frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \frac{z_{\text{эфф}}}{L_{NL}} \quad (1.11)$$

$w_0$  уақыттағы өзгеруін импульстің жиілікті модуляциясы ретінде қарастыруға болады. Жиіліктік модуляция ФӨМ бағытталады және таралу ұзындығының шамасына қарай артады. Басқаша айтқанда, жиіліктік компоненттердің генерациясы оптикалық талшықта үздіксіз таралуы кезінде жүзеге асырылады және ол спектрдің  $z=0$  бастапқы еніне қарағанда кеңейеді. Спектрдің кеңею дәрежесі импульстің формасына байланысты супергаусс импульсі жағдайында  $U(0, T)$  бастапқы өріс мына формуламен беріледі:

$$U(0, T) = \exp \left[ -\frac{1+iC}{2} \left[ \frac{T}{T_0} \right]^{2m} \right] \quad (1.12)$$

мұндағы,  $C$ -модуляция параметрі;

$T_0$ - импульстің бастапқы ұзақтығы.

ФӨМ нәтижесінде жиіліктік модуляция мынаған тең:

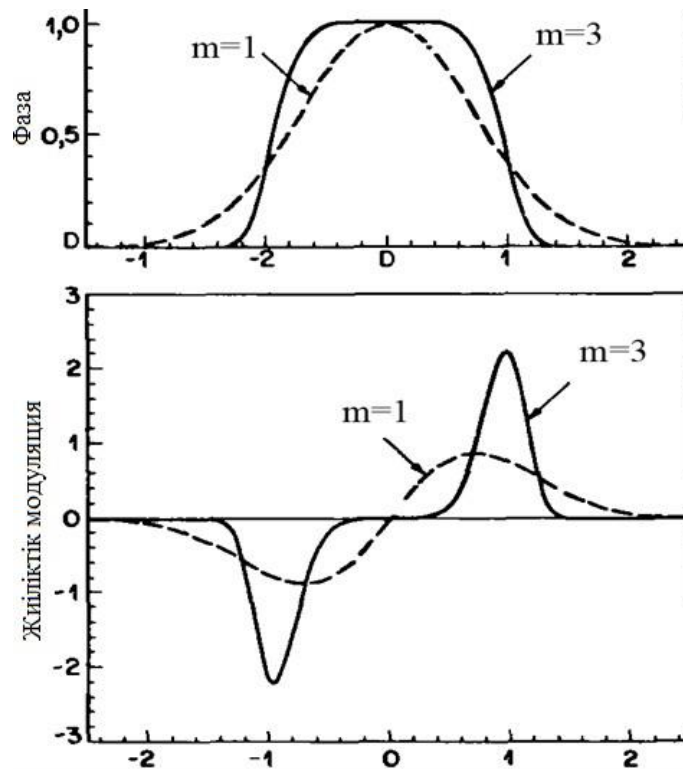
$$\delta w(T) = \frac{2m}{T} \frac{z_{\text{эфф}}}{L_{NL}} \left[ \frac{T}{T_0} \right]^{2m-1} \exp \left[ -\left( \frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right] \quad (1.13)$$

Гаусс импульсінің  $m$  параметрі бірге тең. Үлкен шамалар үшін  $m$  бастапқы импульс тікбұрыш қалпына жақындайды.

Бұл алдыңғы және артқы фронттардың тік өзгеруін арттырады. Бейсызықтық фазалардың ену өзгерістері және ( $m=1$ ) Гаус жағдайында және ( $m=3$ ) супергаусс импульстары  $z_{\text{эфф}}=L_{NL}$  кезіндегі импульс жиілігінде көрсетілген. Спектрдің кеңею коэффициенті шамамен фазалардың максималды ену шамасына тең:

$$\delta w_{max} = 0.86\Delta w\phi_{max} \quad (1.14)$$

Гаусс (штрих сызығы) және супергаусс (үздіксіз сызық) импульстары үшін уақыттағы фазаның ену  $\phi_{NL}$  келтірілген (сурет 1.6) және ФӨМ  $\delta\omega$  жиілік модуляциясының өзгерістері ФӨМ тудыратын спектрлік кеңеюдің өзіне тән белгісі - спектрдің орталық бөлігіндегі құрылымы.



Сурет 1.6- Гаусс (штрих сызығы) және супергаусс (үздіксіз сызық) импульстары үшін уақыттағы фазаның ену

### 1.5 Бейсызық қоссауленің сынуына байланысты эффектілер

Жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі екі жиіліктегі (1310 нм, 1550 нм)

жарық сәулелерін бір модальды оптикалық талшық бойымен жіберу кезінде пайда болатын бейсызықтық үдерістерді зерттеу болып табылғандықтан, осы жағдайда пайда болатын фазалық кросс модуляция эффектісінің өлшеулер нәтижелеріне әсері болуы мүмкін. Оптикалық толқынның поляризация векторының екі ортогональды компоненттерінің арасындағы бейсызық байланыс сыну көрсеткішінің сәйкес компоненттерін әртүрлі  $n_x$  және  $n_y$  шамаларына өзгертіп жібереді. Бұл құбылыс өздігінен индукцияланған деп аталады немесе бейсызықтық қоссәулелік сыну деп аталады. Бұл тарауда талшықты жарықтасымалдағыштағы бейсызықтық қоссәулелік сыну эффектілері және практикалық қолданыстары қарастырылады.

Керрдің оптикалық эффектісінде сәуле көзі қуаты күшті сәуле таралуының әсерінен индукцияланған қоссәулелік сынуы изотропты бейсызықты диэлектриктегі өткен поляризация әлсіз сигналдарының жағдайын өзгерту үшін пайдаланылады [47]. Сәуле көзі қосылған кезде сигналдың параллелденуі және перпендикуляциясы поляризациялы компоненттерінің сыну көрсеткішінің айырмасы сәуле көзі сәуле таратуынан пайда болған қоссәулелік сынудың әсерінен басқаша өзгереді. Жарық тасымалдағыш кездегі екі компонентінің фазаларының қосымша айырмасы сигналды сәуле шашудың поляризация жағдайын өзгертуге алып келеді және сигналдың бір бөлігі поляризатор арқылы өтеді. Сигналдың өшу коэффициенті сәуле көзінің тарату интенсивтілігін өзгерту арқылы анықталынады. Себебі, сигнал бір толқынның ұзындығында болса, сәуле көзі басқа толқын ұзындығында модулданады. Сигналдық сәуле таратудың  $x$  және  $y$  компоненттерінің фазалық айырмашылығының ұзындығы  $L$  жарық тасымалдағыштан шыққан формуласы:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_x - n_y) \quad (1.15)$$

$$n_x = n_x + \Delta n_x n_y \quad (1.16)$$

мұндағы,  $\lambda$ -сигналды сәуле таратудың толқын ұзындығы және  $n_x$  және  $n_y$  сыну көрсеткіштерінің сызықтық бөліктер жарық тасымалдағыштағы ішкі модальды қоссәулелік сынуына байланысты әртүрлі болады.  $\Delta n_x$  және  $\Delta n_y$  бейсызықсыну көрсеткіштері сәуле көзінің сәуле таралуымен болған қоссәулелік сыну нәтижесінде әртүрлі болады.  $x$  осі бойында сызықты полярланған сәуле көзі жағдайын қарастырып көрейік.  $x$  компоненті сәуле көзі поляризация векторына параллель поляризацияланған  $\Delta n_x$  сәйкес табамыз. Егер сигнал үлесін есепке алмасақ, онда:

$$\Delta n_x = 2n_2 |E_p|^2 \quad (1.17)$$

мұндағы,  $E_p^2$  сәуле көзінің тарату интенсивтілігі. Сәуле көзі мен сигнал бір-біріне ортогональды поляризацияланған болса, онда тек қана  $\Delta n_y$  үлесін

бірінші мүше сигнал мен сәуле көзінің толқын ұзындық айырмасы арқылы бере алады [28]. Өздігінен әрекет етуін есепке алмасақ,  $\Delta n_y$  үшін

$$\Delta n_y = 2n_2 b |E_p|^2, \quad (1.18)$$

$$b = X_{xxyy}^{(3)} / X_{xxxx}^3 \quad (1.19)$$

Егер  $X^{(3)}$  таза электроникалық негізде болса, онда  $b=1,3$  (1.14) – (1.19) өрнектерін комбинациялап, фаза айырмашылықтарын аламыз:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda} (\Delta n_L + n_{2B} |E_p|^2) = \Delta n\Phi_L + \Delta\Phi_{NL} \quad (1.20)$$

мұндағы,  $\Delta n_L = n_x - n_y$  сызықтық қоссәулелік сынуымен анықталады, ал Керр коэффициенті мына өрнекпен анықталады:

$$n_{2B} = 2n_2(1 - b) \quad (1.21)$$

$T_p$  сигнал өткізу коэффициенті  $\Delta\Phi$  мен жай арақатынаспен байланыста

$$T_p = \sin^2(\Delta\Phi/2) \quad (1.22)$$

Керрдің оптикалық эффектісін бақылау үшін поляризацияны қолдайтын жарық тасымалдағышты пайдаланады, ол сәуле көзі сәуле таратуының поляризациялану жағдайын сақтайды. Сызықтың екі сәулелік сыну нәтижесінде пайда болатын  $\Delta\Phi_L$  тұрақты ығысу фазасын толқынның 1/4 поляризатор алдына орналастыру арқылы компенсациялауға болады. Мінсіз жағдайда, Керр бекітпесінің уақыт тұрақтысы бейсызықтық белгі беру уақыты  $\sim -4 \phi c$  –пен шектеледі. Салыстырмалы топтық шектеу келесі түрде анықталады:

$$\Delta t_p = \left| \frac{L}{v_{g1}} - \frac{L}{v_{g2}} \right| \quad (1.23)$$

Бұл қателікті азайту үшін арнайы шаралар қабылдамаса 100 метрлік жарық тасымалдағышта ол 1нс-тан асып кетуі мүмкін. Бірінші мүмкіншілік – сигнал толқынының ұзындығын таңдап алу және сәуле көзі толқын ұзындығын минималды дисперсияның толқын ұзындығының 1,3 мкм-ге жақын, қарама-қарсы жақтарынан таңдайды.  $\Delta N_L$ -дың айырмасына байланысты сигналдың полярлық компоненттері әртүрлі жылдамдықпен таралады. Олардың арасындағы салыстырмалы кешігу:

$$\Delta t_p = L\Delta n_L / C \quad (1.24)$$

100 метрлік жарық тасымалдағыш үшін  $\Delta n_L = 5 * 10^{-5}$  болғанда  $\Delta t_p = 17 \text{ пс}$  тең. Оны қоссәулелік сынуы аз жарық тасымалдағышта кішірейтуге болады. “жылдам” осьтері бір-біріне тік бұрышпен орналасқан екі жарық тасымалдағыштарды қолданып  $\Delta t_p$  -ны толық жоюға болады.

Қосқыштың уақыттық тұрақтысына негізгі шектеулер топтық жылдамдықтардың дисперсиясымен қойылады, ол жарық тасымалдағышта әсер ететін сәуле көзі импульстарын кеңейтеді. Импульстің кеңеюіне жарық тасымалдағыштың ұзындығын қысқарту арқылы немесе сәуле көзінің толқын ұзындығын нөлдік дисперсияның толқын ұзындығына жақын етіп қолдану арқылы 1пс-ке дейін кішірейтуге болады.

Сигналдың 100% өтуі үшін сәуле көзінің қуатын мына формулалардан (1.22) және (1.23) алуға болады:

$$P_p = \frac{\lambda A_{\text{эфф}}}{2Ln_{2B}} \quad (1.25)$$

мұндағы,  $A_{\text{эфф}}$  – талшықты өзектің тиімді ауданы. Жарық тасымалдағыштағы шығындарды  $L$  тиімді ұзындыққа алмастыру арқылы ескеруге болады.

### 1.6 Бейсызықтық импульстер формасының өзгеруі

Жарық тасымалдағыш пен полеризатор арқылы өту интенсивтілікке тәуелді болғандықтан, қандайда бір импульстің көмегімен пайда болған бейсызық қоссәулелікті сол импульстің формасын өзгертуге пайдалануға болады. Мысалы, жарық тасымалдағыш бейсызық дискриминатор ретінде жұмыс жасай алады. Бұл құбылысты компрессор қысымындағы импульспен байланысты пьедесталды жоюға қолданады және оны талшықты-оптикалық логикалық ұяшықтарды [45] жасауға пайдаланады.

Бейсызық дискриминатордың жұмысында Керр қосқышындағыдай принцип қолданылады. Негізгі ерекшелігі: сигнал өзі бейсызық қоссәулелік сынуды тудырады және өзінің поляризация күйін өзгертеді. Мынадай жағдайды қарастырайық: оптикалық талшықтың кірісіндегі сәуленің таралуы негізгі бір осіне қатысы  $\Theta$  бұрышпен сызықты-поляриланған болсын. Оның  $E_x$  және  $E_y$  компоненттері (1.21) және (1.22) өрнектерінен анықталған  $n_x$  және  $n_y$  сыну көрсеткіштерінен  $\Delta n_x$  және  $\Delta n_y$  шамаларына өзгертіп жібереді. Жарық тасымалдағыштың шыға берісіндегі екі компоненттердің арасындағы нәтиже шығарушы фазалық жылжу мынаған тең:

$$\Delta \Phi_{NL} = \frac{2\pi L}{\lambda} (|E_x|^2 - |E_y|^2) \quad (1.26)$$

мұндағы, сызықтық қоссәулелік сынудан пайда болған  $\Delta \Phi_L$  фазаның тұрақты жылжуы толқынды пластиканы пайдалану есебінен толықтырылады және кіші сигналдың өтуі тоқтатылады. Бейсызық фазаның эксперименталды өлшенген мәні [16] (1.22)-пен үйлеседі. Индукцияланған бейсызық қоссәулелік

сыну сәуленің поляризатор арқылы өтуіне жағдай жасайды және өткізу коэффициенті келесі түрде анықталады [2]:

$$T_p = \sin^2 \left( \frac{1}{6} \gamma P_0 L \cos(2\theta) \right) \sin^2(2\theta) \quad (1.27)$$

мұндағы,  $P_0$ -бастапқы қуат;  
 $\gamma$ -сызықтық параметрі.

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}} \quad (1.28)$$

Оптикалық талшық бойымен оптикалық импульстар тарағанын  $\gamma P_0 L$  көбейтіндісі арқылы, ФӨМ әсерінен пайда болған  $\Phi_{max}$  максималды фаза жылжуына байланысты және оны  $L_{NL}$  бейсызық ұзындығымен келесі қатынас арқылы да байланыстыруға болады:

$$\Phi_{max} = \gamma P_0 L = \frac{L}{L_{NL}} = \quad (1.29)$$

Формасының өзгеруінің себебі: осы берілген бұрыштың мәні  $\theta$  болғанда  $T_p$  өткізу қуатқа тәуелді. Егер импульс шыңын өткізуді максималды ету үшін  $\theta$  бұрышын алсақ, онда оның шамасы салыстырмалы қуат дәрежесі есебінен тоқтатылады. Мұнда шығысындағы импульс бастапқыдан қысқа болады. Мұндай жағдай экстремалды түрде байқалған [1].  $\theta$ -нің оптималды мәні  $P_0$  сенімділік қуатына тәуелді.  $\theta = 36.2^\circ$  үшін  $\Phi_{max} = 30$  болғанда өткізу 90% дейін жетуі мүмкін.

**2 Бір модалы оптикалық талшықтардағы Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауының табалдырық қуатының өсу шарттарын әртүрлі толқын ұзындықтарында зерттеу**

## 2.1 Зерттеу барысындағы Мандельштам Бриллюэн еріксіз шашырауының негізгі сипаттамалары, күшеюі және табалдырықтың алғы шарттары

Мандельштам-Бриллюэннің еріксіз шашырауы (МБЕШ) бейсызық үдерісі түрінде болады. Ол еріксіз комбинациялық шашырауына (МКШ) қажетті шашырау қуатынан төмен жағдайда жарық жолдарында пайда болып, құрамында бастапқы энергияның бір бөлігі бар, кері бағытта тарайтын стокстық толқынның генерациясы түрінде пайда болады. Оптикалық байланыс жүйесінде МБЕШ кері әсер етуі, сонымен қатар, ол МБЕШ-лазерлерінде және күшейткіштерде пайдаланылуы мүмкін.

МБЕШ тұңғыш рет 1964 жылы байқалған, соңғы жылдары кеңінен зерттелген және [6, 11, 24, 32, 33] ғылыми еңбектерде қарастырылған. МКШ сияқты ол стокстық шашырауының сәуле көзінен аз жиілікте генерациялану түрінде байқалады, бұл жерде жиіліктің жылжуы бейсызық ортамен анықталады. Бірақ, МБЕШ бен МКШ арасында айтарлықтай өзгешеліктер бар. Мысалы, МБЕШ кезінде стокстық толқын сәуле көзі толқынына қарама-қарсы тарайды, ал МКШ кезінде екі бағытта тарайды. Стокстық жылжу МБЕШ (-10ТГц) МКШ қарағанда үш есе аз. МБЕШ сәуле көзінің шекті қуаты оның спектр енінің жалпақтығына байланысты. Салыстырмалы ұзын сәуле көзінің импульсында (ұзақтығы 1мкс аспайтын) 1 мВт ғана болуы мүмкін. Сәуле көзінің қысқа импульстарында, ұзақтығы 10 нс аз болса МБЕШ пайда болмайды. Бұл айырмашылықтардың бір себебі МКШ кезінде оптикалық фон дыбыстар, ал МБЕШ кезінде акустикалық дыбыстар пайда болады.

МБЕШ үдерісін сәулелену көзі, стокстық және акустикалық толқындардың параметрлік байланысы ретінде классикалық түрде сипаттауға болады. Электрстрострикция арқасында сыну көрсеткіштерінің периодты модуляциясына әкелетін сәуле көзі акустикалық толқындарды генерациялайды. Сыну көрсеткішінің интуктивтік Брэг торы дифракциясы нәтижесінде оптикалық сәуленің таралуын кері шашыратады. Тор дыбыс жылдамдығымен қозғалғандықтан  $v_A$  шашыраңқы таралу жиілігі ұзақ толқынды аймақта доплерлік қозғалуға ұшырайды. Кванттық механикада мұндай оптикалық сәулеленудің шашырау фонын жою және стокстық және акустикалық фондардың бір уақытта пайда болуы деп сипаттайды. Шашырау кезінде энергияның және импульстың сақталу заңынан жиіліктер мен үш толқынның толқындық векторларының арақатынастары туындайды [50, 51]:

$$w_A = w_p - w_s \quad (2.1)$$

$$k_A = k_p - k_s \quad (2.2)$$

мұндағы,  $w_p$  және  $w_s$  жиіліктер;

$k_p$  және  $k_s$  - оптикалық сәуленің және стокстық толқындардың толқындық векторлары.

$w_A$  жиілігі және  $k_A$  толқындық вектор акустикалық толқындарды дисперсиялық деңгейде қанағаттандырады.

$$w_A = |k_A|v_A = 2v_A|k_A|\sin(\theta/2) \quad (2.3)$$

мұндағы,  $\theta$  оптикалық сәуле және стокстық толқындардың таралу бағыттары арасындағы бұрыш, ал (2.2) векторлық теңдеуде  $k_p \approx k_s$  жуықталу жасалды. (2.3) теңдеуі стокстық толқын жылжуының шашырау бұрышына тәуелділігін көрсетеді. Дәлірек айтқанда, ол кері бағытта ( $\theta=\pi$ ) максималды және оптикалық сәуле векторымен бағыттас болған кезде жоғалып кетеді ( $\theta=0$ ).

Кері бағыт үшін жиіліктің жылжуы мына түрде беріледі:

$$v_B = \frac{w_A}{2\pi} = \frac{2\pi v_A}{\lambda_p} \quad (2.4)$$

мұндағы,  $k_p = 2\pi n / \lambda_p$  қолдану арқылы (2.2) пайдаланылды;

$n$  – сыну көрсеткіші,

$\lambda_p$  - сәуле көзі толқынының ұзындығы.

Бір модальды жарық жолында таралудың тура және кері бағыттары болады.(2.2) теңдеуінде тура бағытта МБЕШ жоқ екені дәлелденгенімен ( $\theta=0$ )бұл бағытта жарық жолында кенеттен Мандельштам-Бриллюэннің жылу шашырауы пайда болуы мүмкін. Мұның себебі жарық бағыттағышта бағыттаушы акустикалық толқындар болуы және соның нәтижесінде толқындық векторларды таңдау ережелері бузылуы мүмкін. Бұл бірден тікелей бағытта әлсіз стокстық тараудың генерациясы болуы мүмкін [47]. Бұл құбылыс бағыттаушы акустикалық толқындарда кенеттен пайда болған МБЕШ деп аталады. Стокстық тарату спектрында сәуле көзі жиілігінен 10-1000МГц ауытқулы көптеген сызықтарды байқауға болады. Олар өте әлсіз болғандықтан, олардың әсері әрі қарай қарастырылмайды. Жарық бағыттағышта жиілікті жылжуы бар, кенеттен пайда болған МБШ (2.2) формуласында берілген және олар тек кері бағытта пайда болады. Кварц шынысынан жасалған жарық бағыттағыштар үшін типті мәндер  $v_A = 5,96$  км/с болса, онда  $n = 1,45$  толқын ұзындығы мәні  $\lambda_p = 1,55$  мкм,  $v_B = 11,1$  ГГц болады.

Стокстық толқынның интенсивтілігінің артуы МБЕШ кезіндегі  $g_B(v)$ күшейту коэффициентімен сипатталады, ол  $v=v_B$  максималды болады. Бірақ, МКШ әсеріне қарағанда МБЕШ-күшейтуінің формуласы бойынша спектральды кеңдігі өте аз болады,  $\Delta v_B$  спектр жалпақтығы акустикалық толқындарының өшу уақытына немесе фотонның  $T_B$  өмір сүру уақытына байланысты. Іс жүзінде егер акустикалық толқындардың өшуін экспоненциалды ( $\exp(-t/T_B)$ ) деп алсақ, онда МБЕШ- күшейткіш спектрі Лоренц формуласымен анықталады:



$$g_B(\nu) = \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu-\nu_B)^2+(\Delta\nu_B/2)^2} g_B(\nu_B) \quad (2.5)$$

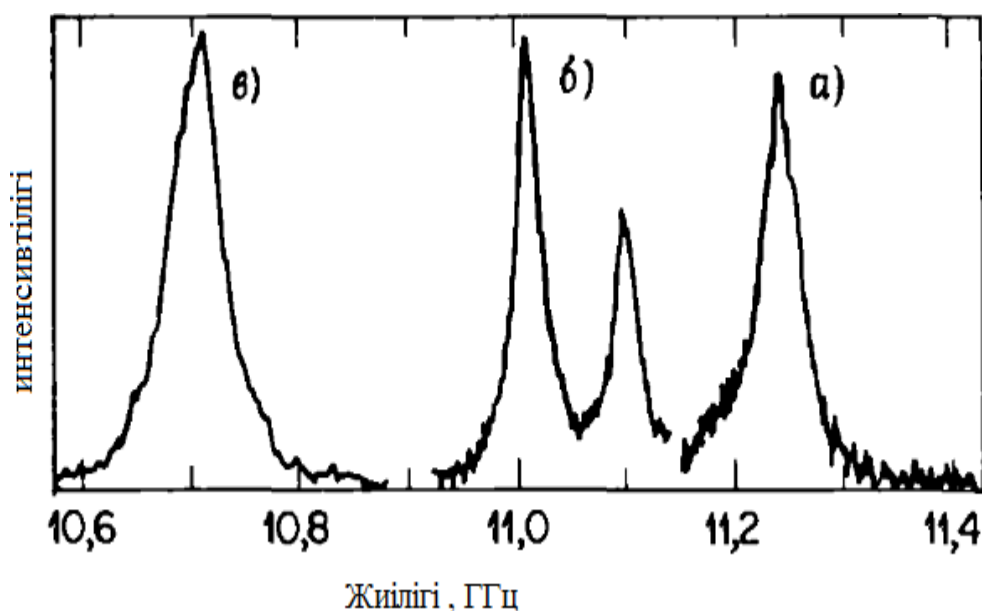
мұндағы,  $\nu_B$  -жартылай биіктіктегі спектр жалпақтығы, ол фотонның өмір ұзақтығымен  $\Delta\nu_B=(\pi N B)^{-1}$  байланысты. МБЕШ күшейткіштің максималды коэффициенті  $\nu=\nu_B$  болса, онда:

$$g_B(\nu_B) = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 p_0 \nu_A \Delta\nu_B} \quad (2.6)$$

мұндағы,  $p_{12}$  - қима акустикалық коэффициенті;

$p_g$  - материал тығыздығы;

$\lambda_p$  - сәуле көзінің толқынының ұзындығы.



Сурет 2.1- Толқын генерациясы 1,525 мкм үш жартылай өткізгіш лазер үшін МБЕШ-күшеюінің спектрлері [1, с.260]

Оптикалық сәуле импульсының ұзақтығы ( $T_0 < T_B$ ) болған жағдайда стационарлық емес МБЕШ теориясы [1, с.259] көрсеткендей МБЕШ-күшеюі (2.6) теңдеуіне қарағанда едәуір төмендейді. Егер  $L_{coh} \gg L_{int}$  болса, онда МБЕШ процесі сәуле көзінің модалық құрылымына тәуелсіз болады, өйткені модалар арасындағы арақашықтық  $\Delta\nu_B$  артады және МБЕШ-күшеюі бірнеше ұзындық байланысындағы бір модалы оптикалық сәуле сияқты болады. Егер  $L_{coh} \ll L_{int}$  болса, онда МБЕШ- күшеюі едәуір төмендейді. Соңғы жағдай байланыстылық ұзындығы  $L$  жарық жол ұзындығымен салыстырмалы болатын жарық жолдарда жүзеге асырылады. Егер оптикалық сәуле спектрі жартылай

биіктік  $\Delta v_p$  Лоренц профилі болса, онда МБЕШ-күшею спектрі (2.5) теңдеуімен сипатталады, бірақ күшейту шегі келесі түрде беріледі:

$$g_B = \frac{\Delta v_B}{\Delta v_B + \Delta v_p} g_B(v_B) \quad (2.7)$$

Сонымен, егер  $\Delta v_p \gg \Delta v_B$  болса, онда МБЕШ күшеюі  $\Delta v_p / \Delta v_B$  есеге азаяды. Интенсивті байланысты теңдеулер жүйесін (2.1), (2.2) аналитикалық түрғыдан шешуге болады. Бұл шешім МБЕШ толық сипаттауға пайдаланылса, онда құбылыстың физикасын түсіну үшін сәуле көзін жіңішкерусіз жағдайда қарастырған жөн, бұл МБЕШ табылдырығы көлемін бағалауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда стокстық толқын сәуле көзі толқынына қарама-қарсы тарап теңдеуге сәйкес экспоненциалды ұлғаяды:

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_{эфф} / A_{эфф} - \alpha L), \quad (2.8)$$

$$P_0 = I_p(0) A_{эфф}$$

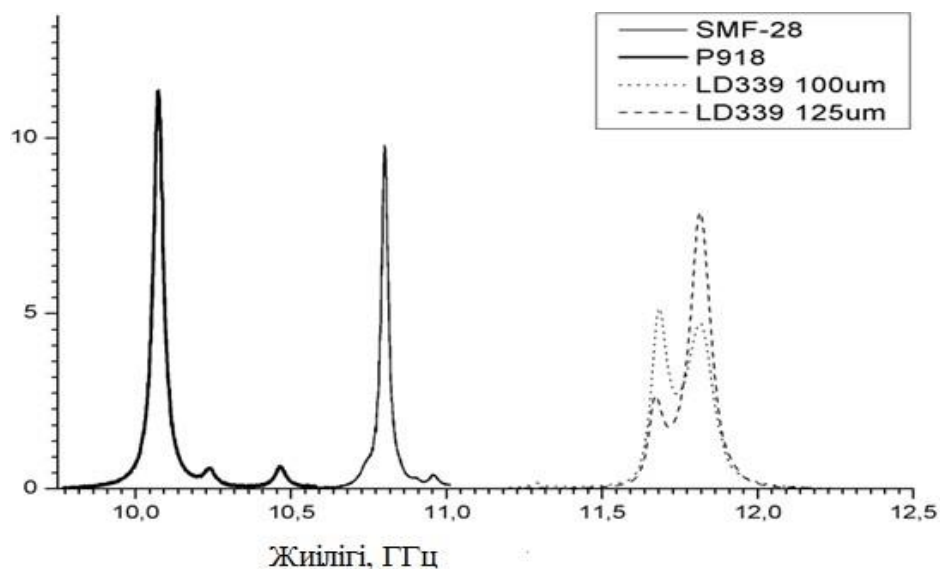
мұндағы,  $A_{эфф}$  - қиманың тиімді ауданы, ал байланыстылықтың тиімді ұзындығы келесі теңдеумен беріледі:

$$L_{эфф} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (2.9)$$

(2.9) теңдеуі көрсеткендей  $z = L$  нүктесінде пайда болатын стоксты сигнал МБЕШ арқасында күшейеді. Тәжірибеде бұл сигнал әдетте болмайды және жарықжолда пайда болатын лездік МБШ шуынан туындайтын стокстық толқын болады. МБШ кезіндегідей бұл жарықжол бойында болатын эффективті бір фотонның жойылуларын компенсациялайтын күшейту нүктесіндегі бір модаль инжекциялануына эквивалентті болады [1, с.256]. Р.Агравал қолданған тәсілді пайдалансақ, МБЕШ табалдырығы сәуле көзінің шекті қуаты қолжетімді және ол төмендегідей болады:

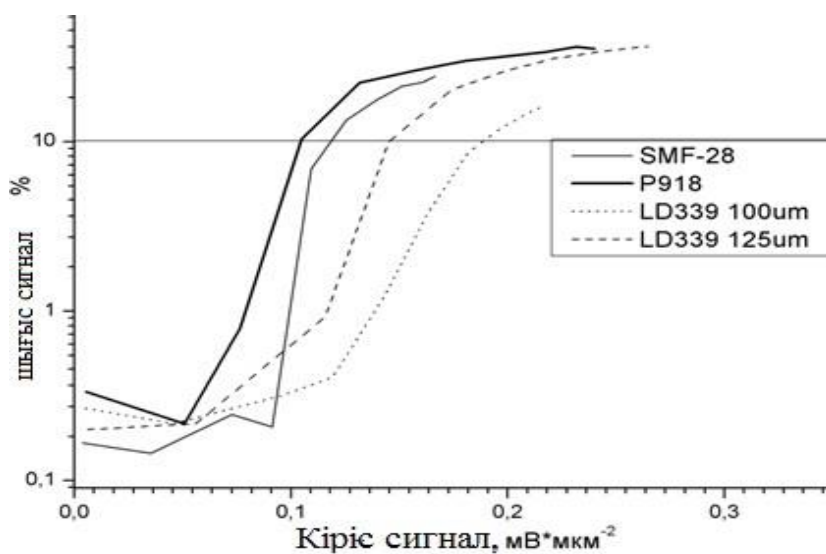
$$g_B P_0^{CR} L_{эфф} A_{эфф} \approx 21 \quad (2.10)$$

Берілген теңдік бойынша (2.6) формуласымен берілген МБЕШ-күшеюінің шекті мәні көрсетілген. МБЕШ жағдайында алынған (2.6) теңдеуі стокстық және сәуле көзі толқындары жарық өткізгіште поляризациясын сақтап қалғанына немесе сақтамағанына байланысты 12 есе өсуі мүмкін. Толқын депаряризация жағдайында сандық фактордың 2 есе өсуі байқалады.



Сурет 2.2-МБЕШ спектрлері 100 мкм және 125 мкм жарықөткізгіштері үшін шектердің айырмашылығы

Мода өрісінің нормаланған шығу қуатынан кері жүретін қуат үлесіне тәуелділігі көрсетілген (сурет 2.3).



Сурет 2.3- Мода өрісінің нормаланған шығу қуатынан кері жүретін қуат үлесіне тәуелділігі

Берілген жұмысында көрсетілгендей МБЕШ өзек диаметріне тәуелді болады. Шын мәнінде спектрдің енінің максималдылығы сыртқы диаметр 100 мкм болған кезде қолжетімді. Тек осы жарықөткізгіште МБЕШ жоғарғы шегі байқалады (сурет 2.3).

## 2.2 МБЕШ табалдырығының сыртқы әсерлерге тәуелділігін анықтау әдістері

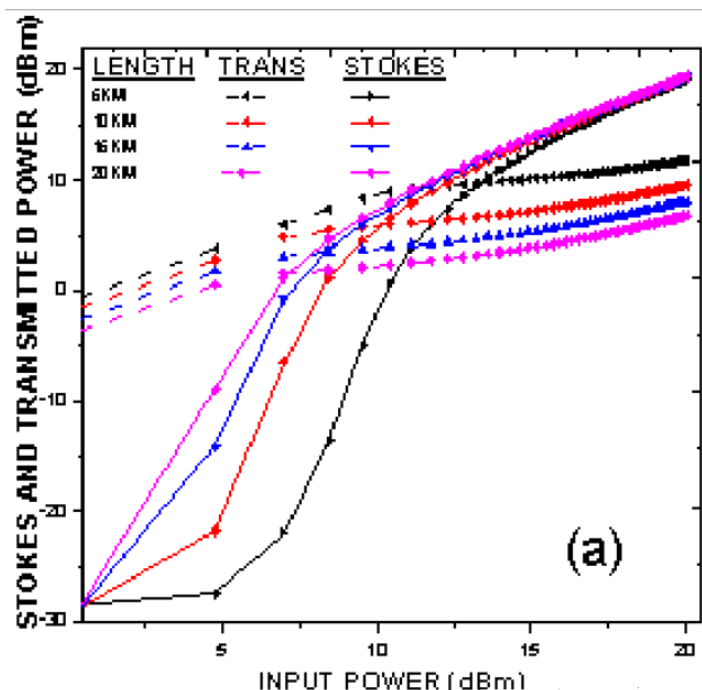
Жоғарыда келтірілген (2.10) шартын түрлендіре жазайық:

$$P_{\text{таб}} = C \frac{k \cdot A_{\text{эфф}}}{g_B L_{\text{эфф}}} \left( 1 + \frac{\Delta \nu_{\text{стокс}}}{\Delta \nu_{\text{тура}}} \right), \quad (2.11)$$

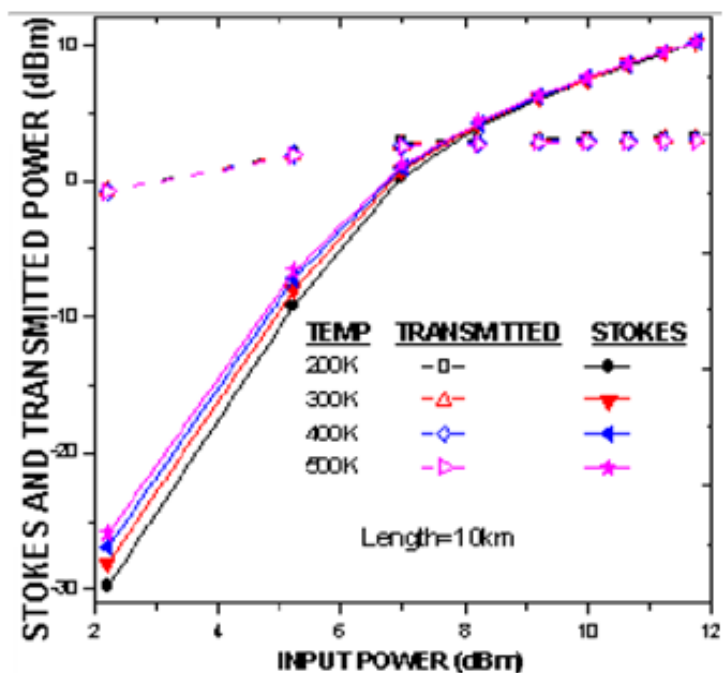
мұндағы,  $C$  – коэффициенті 21-ге тең, ал поляризация коэффициенті –  $1 < k < 2$  мәндері аралығында өзгереді,

$P_{\text{таб}}$  – МБЕШ табалдырығы талшықтың тиімді көлденең қимасының ауданына –  $A_{\text{эфф}}$  тура, ал оның  $L_{\text{эфф}}$  ұзындығына кері пропорционал болады.

МБЕШ табалдырығын анықтауға арналған ғылыми еңбектердің екінші бір бөлігі оптикалық талшықтардың бойымен тура бағытта таратылған сәуленің сипаттамаларымен қоса (2.5), кері бағытта тексеруші сәуле тарату арқылы, оның сипаттамаларын (2.2) есептеу арқылы анықтаумен ерекшеленеді. Ол үшін оптикалық талшықты эксплуатацияға енгізу алдында алдын ала әдістер арқылы МБЕШ табалдырығын әр талшық үшін анықтау қажет [53].

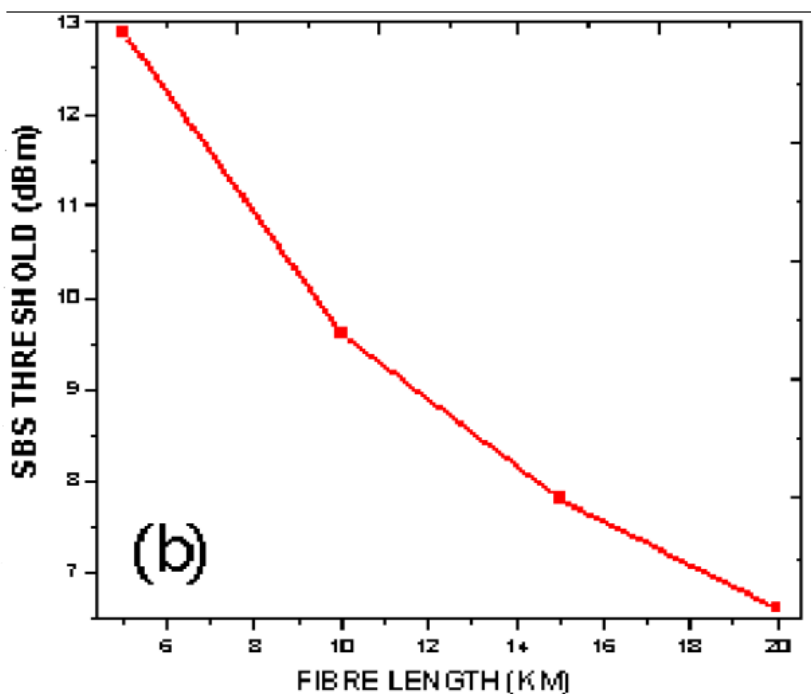


Сурет 2.4- Әртүрлі 6, 10, 16 және 20 км ұзындықтары үшін оптикалық талшыққа енген, өткен және кері шағылған сәулелердің энергияларын тіркеу арқылы анықтау

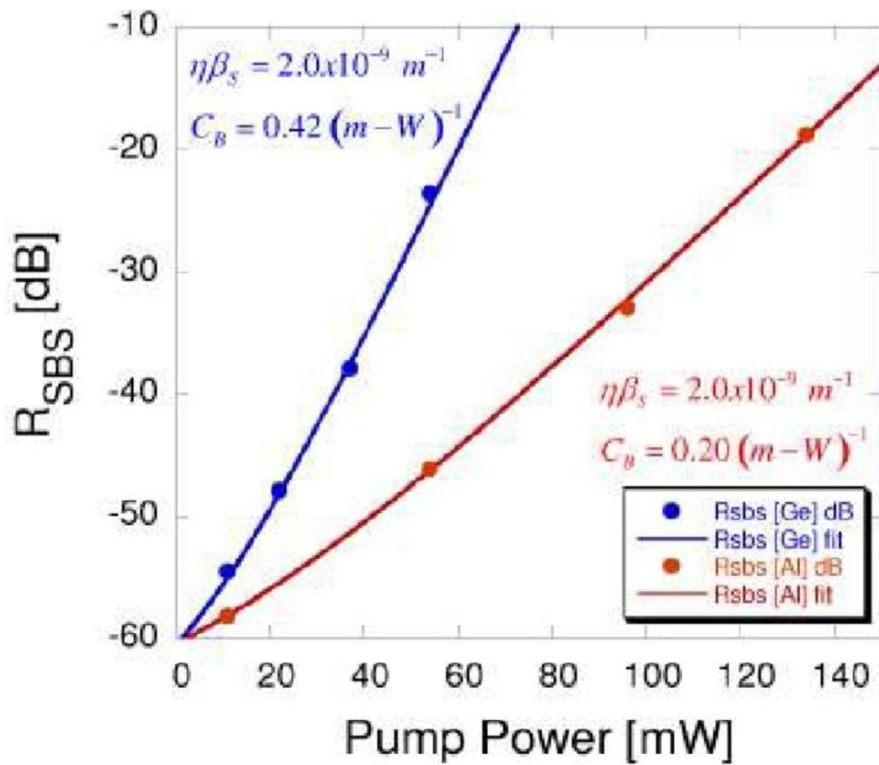


Сурет 2.5. Өртүрлі температураларда МБЕШ эффектiлерiн тiркеу нәтижелерi

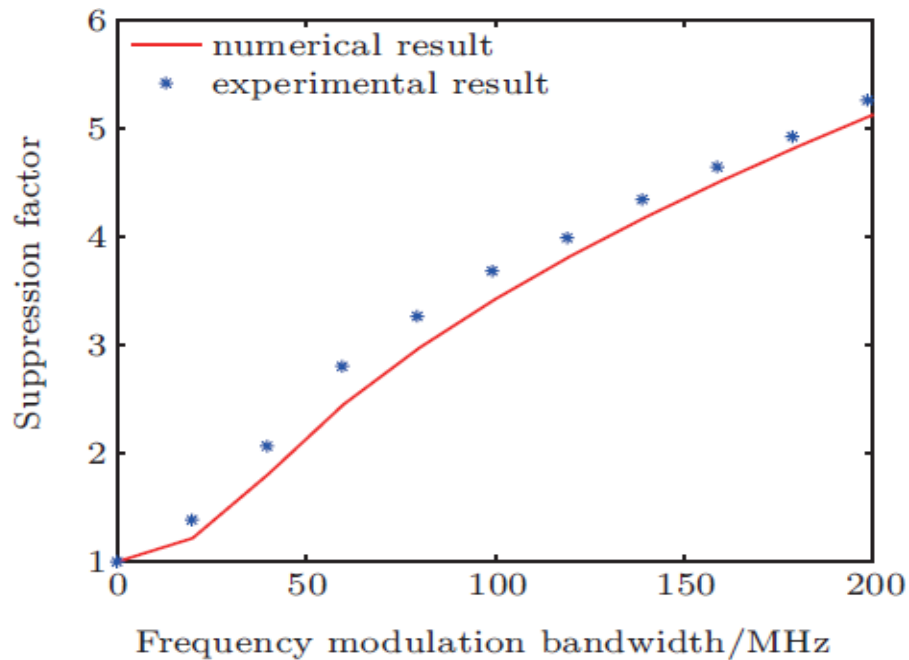
Өртүрлi температураларда МБЕШ эффектiлерiн тiркеп, МБЕШ табалдырыгының төмендейтiндiгi байқалды (сурет 2.5).



Сурет 2.6- Оптикалық талшықтың әр түрлi ұзындықтарындағы бейсызық эффектiлердiң басталу нүктелерi



Сурет 2.7-Оптикалық талшық құрамына Алюминий мен Германий молекулаларын ендіру нәтижесі



Сурет 2.8- МБЕШ бәсеңдету коэффициентінің амплитудалық модуляцияға тәуелділігі

Есептеу жүргізу барысында МБЕШ бәсеңдету коэффициенті модуляция жиілігі және амплитудалық модуляцияға тәуелді екені байқалды және ол

тәжірибе арқылы айқындалды. Модель арқылы алынған нәтижелерде оптикалық талшықтың ұзындығы 50 км болғанда Бриллюэннің күшею енінің сызығы 40 МГц, ал модуляция жиілігі 10 кГц құрайтыны көрсетілген. Тәжірибелік және модельдеу нәтижелерінің көрсетілуі бойынша бәсеңдету коэффициенті амплитудалық модуляция өскен сайын артатындығы байқалады (сурет 2.8).

### 2.3 Сәулелену көзінің жіңішкеруі және күшеюдің қанығуы

МБЕШ табалдырығына жеткенде сәулелену көзі энергиясының едәуір бөлігі стокстық толқынның энергиясына ауысады. Сәулелену көзінің жіңішкеруін есептеу үшін (2.1) және (2.2) теңдеулерін нақты шешу керек. Жалпы шешім мына түрде болады :

$$I_s(z) = \frac{b_0(1-b_0)}{G(z)-b_0} I_s(0) \exp(-\alpha z) \quad (2.12)$$

$$I_p(z) = \frac{(1-b_0)G(z)}{G(z)-b_0} I_p(0) \exp(-\alpha z) \quad (2.13)$$

мұндағы,

$$G(z) = \exp\{(1-b_0)(g_0\alpha)[1-\exp(-\alpha z)]\}, \quad (2.14)$$

$$b_0 = I_s(0)/I_p(0),$$

$$g_0 = gBI_p(0)$$

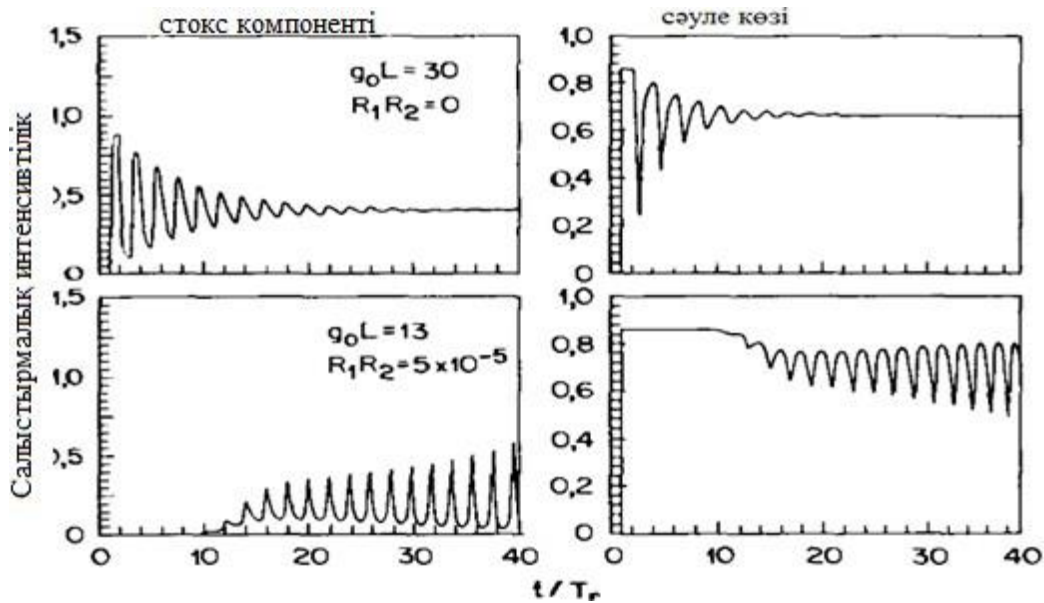
мұндағы,  $b_0$  сәулелену көзінің бастапқы қуатының қай бөлігі стокстық толқынның қуатына ауысатынын көрсетеді, әлсіз сигналдың күшею коэффициенті.  $G_0$  – (2.12) және (2.13) теңдеулері сәулелену нүктесі  $z=0$  және  $z=L$  кезде талшыққа енгізу аумағын МБЕШ күшейту кезінде талшық ұзындығы бойындағы сәулелену толқындарының және стокстық толқындардың интенсивтіліктерінің өзгеруін сипаттайды.

ФӨМ және ФКМ әсерлері стокстық толқындардың және сәулелену толқындарының шектік қуат импульсының салыстырмалы түрде төмендігіне байланысты айтарлықтай аз болады. (2.70) және (2.71) теңдеулерінде  $I = |I|^2$  есептеп және  $\beta_2 j, \gamma_j$  ескермесек, онда МБЕШ уақыттық эволюциясын сипаттайтын мына түрдегі теңдеуді аламыз:

$$\frac{\partial I_s}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial I_s}{\partial t} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial I_p}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial I_p}{\partial t} = -g_B I_p I_s + \alpha I_p \quad (2.16)$$

Мұндағы,  $v_g$  - топтық жылдамдық.



Сурет 2.8- Стокстық толқынның интенсивтілігінің уақыттық эволюциясы (сол баған) және сәулелену толқынының (оң баған) кері байланысымен (астында) және кері байланыссыз (жоғарыда)

Стационарлық жағдайда бұл теңдеуле (2.1) және (2.2) теңдеулеріне келеді. Топтық жылдамдық сәуле көзінің толқындарына және стокстық толқындарда бірдей болғанымен, олардың салыстырмалы жылдамдығы  $2v_g$  тең, өйткені олар бір-біріне қарсы қарайды. Релаксациялық тербеулердің топтық жылдамдықтардың қалпына келтіру нәтижесінде пайда болады. Релаксациялық тербеулердің жылдамдығын, жиілігін (2.7) және (289) теңдеулеріне, стационарлық шешімнің тұрақтылығына талдау жасап анықтауға болады. Сыртқы кері байланыс әсерін талшық шетіндегі шекаралық жағдайларды қарастырып ескерген жөн. Мұндай тұрақтылықтың сызықтық талдауы үздіксіз сигнал тұрақсыз болған кезде жасалады. Егер  $h$ -тың әрекетті бөлшегі оң болса, өшуы  $v_r = \text{Im}(h)/2\pi$  жиілік тербеулерінің релаксациялық экспоненттілігі болады. Егер  $h$ -тың әрекетті бөлігі теріс болса, онда уақыт өткен сайын қоздыру артады, ал үздіксіз сигнал тұрақсызданады. Бұл жағдайда МБЕШ сәуле көзі және стокстық сәулелердің интенсивтілік модуляциясына әкеледі. Стокс толқынының және сәуле көзі толқынының интенсивтілік уақыты бойынша эволюциясы көрсетілген.

Талшықтағы жоғалтулар  $\alpha L = 0.15$  [1, с.267]  $g_0 L = 30$  үшін жоғарғы суретте кері байланыс болмаған кездегі релаксациялық тербеулер көрсетілген.  $2T_r$  тербеулер периоды, мұнда  $T_r$  - өту уақыты. Келесі физикалық механизм релаксациялық тербеулер көзі болып табылады. Талшықтың басындағы стокстық толқынның тез артуы сәулеленуді жіңішкертеді, бұл күшейтуді төмендетуге әкеледі. Содан кейін күшею қалпына келеді және процесс



қайталанарды.

Суреттегі төменгі қатар  $R_1 R_2 = 5 \cdot 10^{-5}$  әлсіз кері байланысқа сәйкес, мұндағы  $R_1$  және  $R_2$  - талшықтың шеттерінен кері шағылу коэффициенті.  $g_0 L = 13$  күшею шекті мәннен төмен, бірақ кері байланыс әрекеті нәтижесінде МБЕШ табалдырығы төмендейді және стокстық толқынның генерациясы жүзеге асады. Оның орнына ( $z=L$ ) сәулелену толқындарының шығу интенсивтілігі және ( $z=0$ ) стокстық толқындар осциллирленеді. Сурет стационарлы болады, бұл жағдайда кері байланыс күшейеді  $R_1 R_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ , өйткені  $b$  параметрінің мәні тұрақтылық аумағында жатыр. Барлық жоғарыдағы аталған МБЕШ динамикалық қасиеттері эксперимент кезінде анықталды.

#### 2.4 МБЕШ эффектісін анықтауға арналған математикалық модель негізі

МКШ сияқты МБЕШ жарық бағыттағышта тарайтын стокстық толқын және сәуле көзі толқындарының өзара байланысын ескеруді қажет етеді. Стационарлы жағдайда мұндай байланыс өзара байланысты теңдеулер жүйесіне тәуелді (2.8) және (2.9) теңдеулеріне ұқсас. Бір ғана өзгешелігі  $dl_s/dz$  стокстық толқындардың сәуле көзі толқындарына қарама-қарсы тарау бағыттарына сәйкес өзге белгілеу қолданылады. Екі жеңілдету жасауға болады. МБЕШ салыстырмалы төмен мәндері негізінде жиілік жылжуын  $\omega_p = \omega_s$  қабылдауға болады. Сол себептен жарық бағыттауыштағы жоғалтулар сәуле көзі және стокстық толқындар үшін бірдей болады, яғни ескерсек:  $\alpha_p = \alpha_s$ . Осы жақындатуларды ескерсек:

$$\frac{\partial I_p}{\partial z} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial I_s}{\partial z} = -g_B I_p I_s + \alpha I_p \quad (2.18)$$

мұндағы,  $I_p$  ( $p$  – ағылшын тіліндегі «pump», орысша «накачка», қазақ тілінде «тура бағыттағы сәуле көзі»),  $g_B$  – [1] МБЕШ күшейту коэффициенті. Жоғалтулар болмаған  $\alpha = 0$  кездегі МБЕШ энергия сақталу күшін тексеру оңай:

$$\frac{d}{dz} (I_s - I_p) = 0 \quad (2.19)$$

бірақ, нақты тәжірибелік жұмыстарда жұтылу коэффициентінің бұл жағдайы қарастырылмайды.

#### 2.5 МБЕШ табалдырық қуатын жоғарлату мәселесін зерттеу

Оптикалық талшықта пайда болатын бейсызықтық эффектілер уақыт бірлігіне байланысты жеке оптикалық талшық арқылы берілетін ақпараттың көлеміне сәйкес фундаменталды шектеулерді туғызады. Байланыс жолдарын жүйелі түрде жобалаушылар қажет емес бейсызықтық эффектілердің шектеулері туралы білуі қажет және олардың алдын алу барысында іс-шаралар жүргізуі керек.

Оптикалық талшықтың оптикалық қуат деңгейін арттырған кезде МБЕШ әсерінен белгілі бір мөлшерде немесе МБЕШ табалдырық шамасында оптикалық талшық бойында  $n$  рефракциясының индекс шамасының әсерінен өзгеретін акустикалық толқын пайда болады.  $n$ -нің өзгерісі жарықтың шашырауын туғызады және ол өз барысында акустикалық толқындардың қосымша генерациясына әкеледі.

Табиғаты бойынша пайда болатын акустикалық толқын 10...13ТГц жиіліктік спектрде орналасқан гипердыбысты болып саналады. Акустикалық жиілік толқынымен анықталатын  $\omega_A$  Бриллюэндік жиілік ығысуы  $\nu_B$  келесі теңдікпен анықталады:

$$\nu_B = \frac{w_A}{2\pi} = \frac{2n\nu_z}{\lambda_0} \quad (2.20)$$

$\lambda = 1550$  кварцтық оптикалық толқындағы акустикалық толқынның жылдамдығы  $\nu_A = 5 * 10^3$  м/с және  $\nu_A \approx 10$  ГГц(0,1нм). Көбінесе физикалық процесті жақсы түсіну үшін Бриллюэндік жиіліктік ығысуды акустикалық гипердыбысты толқынның жарықтық ағымының модуляциясымен немесе Доплер эффектісімен салыстырады. МБЕШ табалдырығының қуатының  $P_{МБЕШ}$  теңдеуі:

$$P_{МБЕШ} \approx \frac{21w_A \varepsilon_{\text{эфф}}}{g_B L_{\text{эфф}}} \left( 1 + \frac{\Delta\nu_{LS}}{\Delta\nu_B} \right) \quad (2.21)$$

мұндағы,  $\varepsilon$  – толқынның поляризациялық күйіне тәуелді 1 мен 2 аралығындағы сандық мән;  $g_B \approx 4,6 * 10^{-11}$  м/Вт – МБЕШ күшейткіш коэффициенті (оптикалық талшыққа тәуелді);  $L_{\text{эфф}}$  – келесі теңдеумен анықталатын оптикалық талшықтың тиімді ұзындығы:

$$L_{\text{эфф}} = \alpha^{-1} [1 - \exp(-\alpha L)]. \quad (2.22)$$

мұндағы,  $\Delta\nu_{LS}$  – сәуле көзінің спектрлік ені;  
 $\Delta\nu_B \approx 20$  МГц(1550нм) МБЕШ әсерлесу жолағы. (2.22)  
 теңдікті ыңғайлы дәстүрлі логарифмдік түрде жазуға болады:

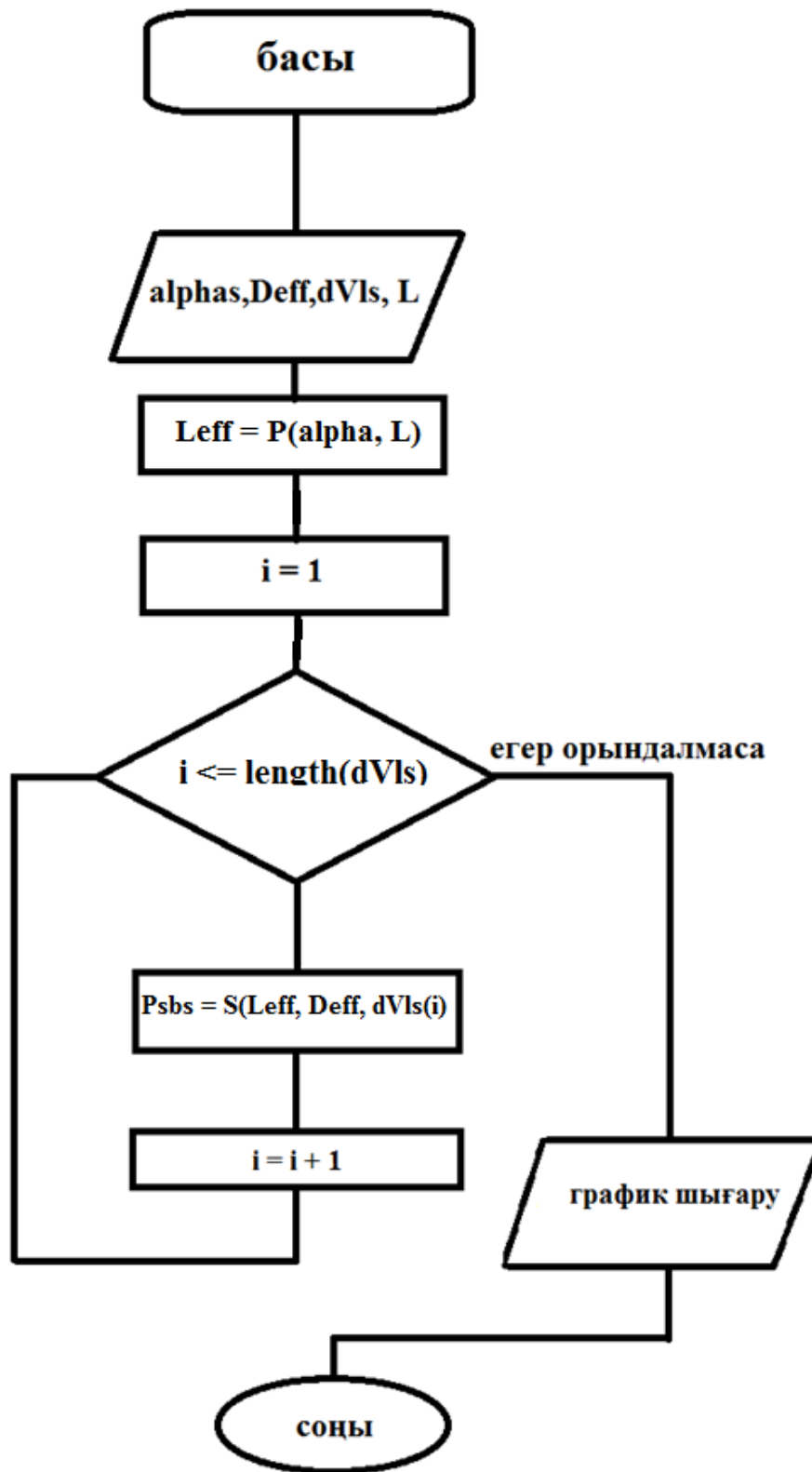
$$L_{\text{эфф}} = \frac{4.343}{\alpha} \left( 1 - \frac{1}{e^{0.23\alpha L}} \right) \quad (2.23)$$

Шамасы 40 км-ден ұзын жолдар үшін  $a = 0,22$  дВ/км кезінде оптикалық талшықтың тиімді ұзындығы шамамен 20 км құрайды. (2.22) теңдіктен МБЕШ табалдырығы тербелістің сәулелену көзінің спектрлік еніне тәуелді екені байқалады (модуляциялайтын сигнал болмаған кезде).  $L_{эфф} = 20$  км және оптикалық талшықтың модасының 9,2 мкм тиімді диаметрі кезінде теңдікті келесі типтегі ыңғайлы логарифмдік түрде жазуға болады:

$$P_{МБЕШ}[dBm] = 14.8 - 10lgL_{эфф} + 10lg\left(1 + \frac{\Delta v_{LS}}{20}\right) + 20lg\left(\frac{D_{эфф}}{9.2}\right) \quad (2.24)$$

МБЕШ табалдырық қуатының мәнін есептеу және графиктерді алу үшін Matlab бағдарламалау ортасы қолданылды.

Matlab бағдарламалау ортасында жазылған бағдарлама листингі Қосымша Б көрсетілген. Matlab бағдарламалау ортасында жазылған программа алгоритмі блок-схема бойынша жүзеге асырылады (сурет 2.10).



Сурет 2.10- МБЕШ табалдырық қуатының мәнін есептеуге арналған блок-схема

### 3 Қос толқынды бір бағытта жіберу арқылы МБЕШ эффектісін зерттеуге арналған тәжірибе

#### 3.1 Зерттеу объектілері

Эксперименттік зерттеу үшін G.652C–D типтегі стандартпен классификацияланатын, телекоммуникацияда кеңінен қолданылатын бір модальды оптикалық талшық пайдаланылды [64].

Дисперсиясы ығыспаған бір модальды сатылы талшық оптикалық телекоммуникациялық жүйенің негізгі қосалқы бөлігі болып табылады. 1310 нм және 1550 нм толқын ұзындығында сигналды таратуға оңтайландырылған кең тараған талшық түрі болып табылады. L-диапазонының толқын ұзындығының жоғарғы шегі –1625 нм. Макромайысу талаптары : G.652.A/B - OS1 эквиваленті (классификация ISO/IEC 11801), G.652.C/D – OS2– эквиваленті бойынша қисықтық радиусы 30 мм кем болмауы керек.

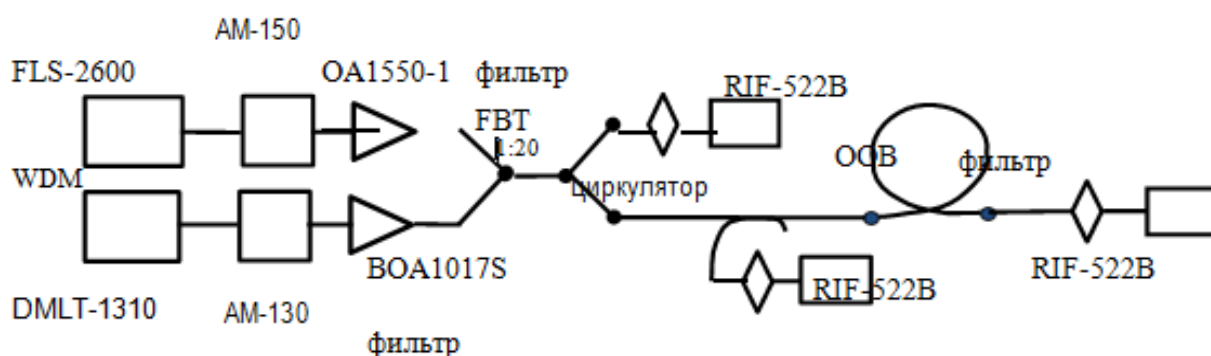
Талшықты пайдалану - G.652 40 км жоғары ара қашықтықта таратудың жоғары жылдамдығында бір модальды талшықтарды пайдалану сапа стандарттарына сәйкес келеді және соңғы қабылдағыш аппаратураны күрделендіруді талап етеді.

Талшық стандартты зауытта шығарылған үлкен диаметрі 265 мм, кіші диаметрі 170 мм, екі жақ аралығы 150 мм бірмодальды талшық катушкасына оралған (сурет 3.1).



Сурет 3.1-Бірмодальды оптикалық талшық

Бір модальды оптикалық талшық бойымен толқын ұзындықтары 1310 нм және 1550 нм болатын жарықты бір бағытта жіберу арқылы МБЕШ эффектісін бақылауға арналған тәжірибелік жұмыста аталған толқын ұзындықтарындағы кіріс, шығыс және кері шағылған сәуле қуаттары өлшенді (сурет 3.2).



Сурет 3.2 - 1310нм және 1550нм толқын ұзындықтарында МБЕШ эффектін зерттеу тәжірибелік құрылғысы

Жұмысты ұйымдастыру үшін осы толқындарда сәуле көздері, электрлік импульстардың генераторы көмегімен басқарылатын интенсивтіліктің модуляторлары, аталған толқын ұзындықтарындағы сәулені күшейтетін күшейткіштер қолданылды. Күшейтілген сәулелер модаларды қосатын тармақта бір арнаға бірігеді. Келесі тармақта біріккен сәулелердің жалпы кіріс қуатын өлшеу үшін 5% бөлігі бөлінеді. Бұл бақылауға арналған бөлігі арнайы фильтр ақылы ұйымдастырылып, өлшеу құрылғысына бағытталады [65]. Қалған сәулелердің негізгі бөлігі талшықты циркулятор арқылы бір мадалы оптикалық талшыққа енгізіледі. Ұзындығы белгілі оптикалық талшық бойынан өткен және кері шағылған жарықтың қуаттары фильтрлерден өтіп тіркеуші құралға жетеді [64, 66, 67].

1310 нм жарық толқынын генерациялау үшін DMLT-1310 сәулелену көзін қолданып, оны AM-130 амплитудалық модулятор арқылы жарық толқынын импульстарға модуляция жасап, оптикалық сигналдың деңгейін қалпына келтіру үшін EDFA (BOA1017S) күшейткіші қолданылады. Күшейткіштің көмегімен сигнал деңгейі 15 дБм мәніне дейін күшейтілді. 1550 нм жарық толқын көзі ретінде FLS-2600 сәуле көзі қолданылып, AM-130 амплитудалық модулятор арқылы жарық толқынын импульстарға модуляция жасап, EDFA (OA1550-1) күшейткішінің көмегімен оны 27 дБм мәніне дейін күшейтілді.

Генератордан шыққан сәуле көзі тікелей АЖЖ интенсивтілік модуляторы арқылы (кірісінде генерациядан шыққан сәуле көзін интенсивтілік модуляторы қабылдап, оны тасмалданатын жиілікпен модуляциялайды) модуляцияланады.

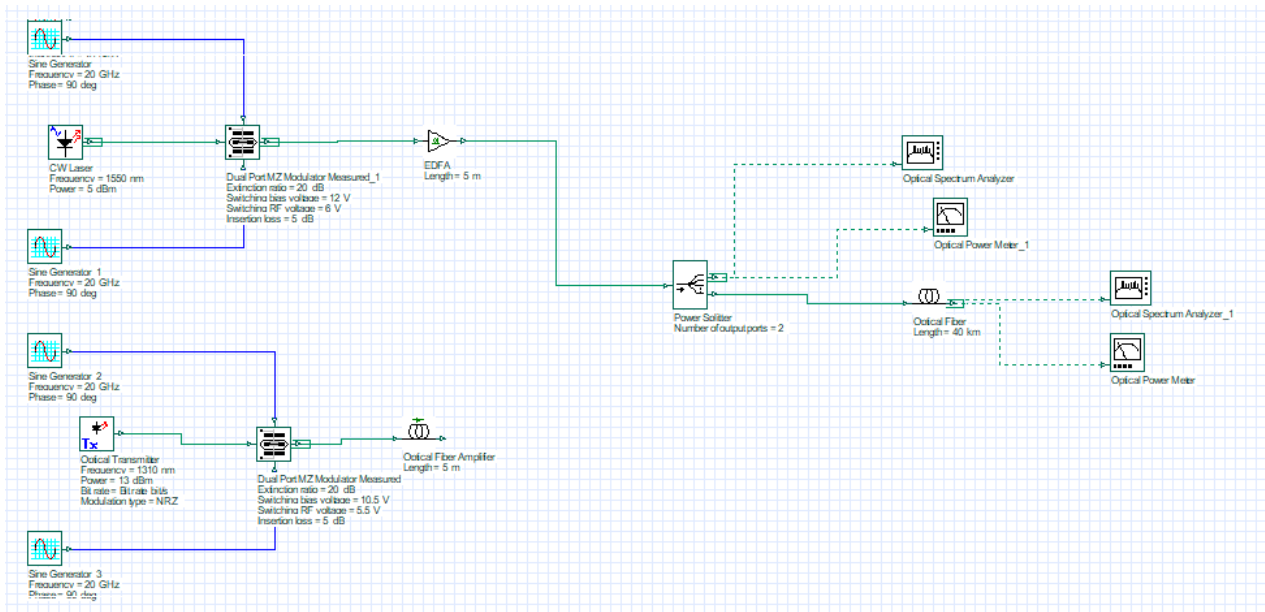
Амплитудалық модуляция жиіліктің жұмыс жолағы 20 ГГц жоғары, жартылай толқынды кернеу 3,3 В және 5 В JDSU APE Microwave Analog интенсивтілік модуляторы қолданылды (сурет 3.3).



Сурет 3.3- JDSU APE MicrowaveAnalog интенситілік модуляторы

Модулятор өлшемдерінің ұзындығы 120 мм жетеді, ені 15 мм құрайды. 0,13-20 ГГц диапазонындағы жиілік сипаттамасының біртектілігі 7 дБ құрайды. Толқынның жұмыс ұзындығының диапазоны зерттеуде қолданылатындай 1550 нм және 1310 нм. Модулятордың да жоғалтулары шамамен 3дБ құрайды. Максималды кіру қуаты 200 мВт дейін болады.

Спектралды мультиплексерлеу (тығыздау) технологиясын (WDM) пайдалану арқылы бір модальды оптикалық талшық бойымен екі физикалық араны бір мезгілде тасымалдауға мүмкіндік алдық. Бұл тәсіл екі әр түрлі жиіліктегі толқынды бір мезгілде таратқан кезде бір-бірімен интерференцияланбай тасымалдауына мүмкіндік береді.



Сурет 3.4 - 1310нм және 1550нм толқын ұзындықтарында МБЕШ эффектін анықтауға арналған модель

МБЕШ эффектін анықтауға арналған модель optisistem 17.0 бағдарламасында құрылды.

Сондықтан, екі жарық жол WDM мультиплексоры арқылы біріктіріліп, FBT талшықты оптикалық тармақтаушының көмегімен жалпы қуаттың 5% бөлігі кіріс толқындарды тіркеуші RIF-522B құралына бағытталды. Жарықтарды өлшеу қажеттілігіне байланысты арнайы көпфункционалы фильтрлер арқылы 1310 нм, 1550 нм және олардың біріккен кездегі қуаттары бөлініп отырды [68, 69].

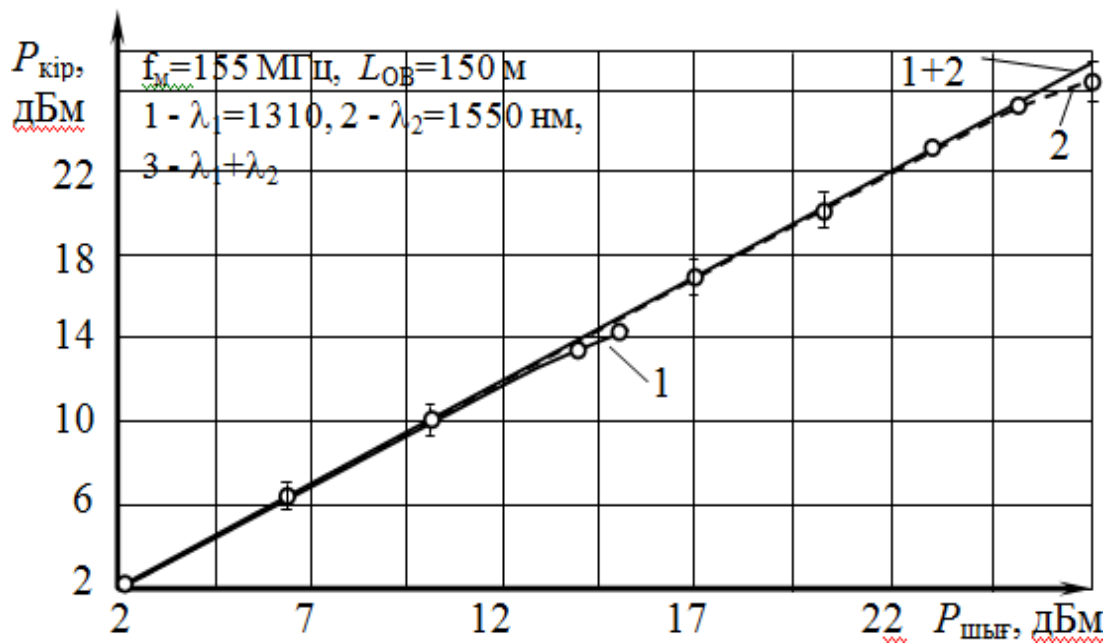
### 3.2 Өлшеу әдістемелері

Өлшеулер әр толқын үшін жеке толқын ұзындықтарда, сонымен қатар, екі толқынды бір уақытта, бір бағытта оптикалық талшық бойымен жіберу арқылы жүргізілді. Жоғарыда аталған барлық құрылғылардың, жарық көздерінің, жарық импульстарды генерациялайтын модуляторлардың, фильтрлердің жиіліктерін мен қуаттарын, күшейту коэффициенттерін реттегеннен кейін, оптикалық талшықтың бір ұзындығы үшін жоғарыда аталған үш режимге сәйкес (1310 нм, 1550 нм және екеуін бірге) кіріс, шығыс және кері шағылған әулелердің қуаттары тіркеліп отырды. Әрбір өлшеуді кемінде бес реттен жүргізіп, нәтижесінде орташа мән тіркеуге алынды. Бір модаль оптикалық талшықтың МСЭ-Т G.652С ұсынылған паспорттық мәліметтері төмендегі кестеде көрсетілген (кесте 3.1).

Кесте 3.1- Сыну көрсеткіші сатылап өзгертін бір модаль оптикалық талшықтың паспорттық мәліметтері

Өшу коэффициенті, дБ/км, көп емес	1310 нм	0,35
	1550 нм	0,22
Модальдық өрістің диаметрі, мкм	1310 нм	9,2±0,4
	1550 нм	10,4±0,8
Модальдық өрістің концентрациялық коэффициенті, мкм, көп емес	0,8	
Кабельден сыртқа шашырау толқын ұзындығы, нм, көп емес	1260	
Нөлдік дисперсия толқын ұзындығы	1310±10	
Хроматикалық дисперсия коэффициенті көп емес, пс/(нм км), толқын ұзындықтар диапазонында	1285-1330 нм	3,5
	1525-1575 нм	18
Нөлдің дисперсия толқын ұзындығы аймағындағы дисперсиялық сипаттамасының коэффициенті, пс/(нм км), көп емес	0,092	

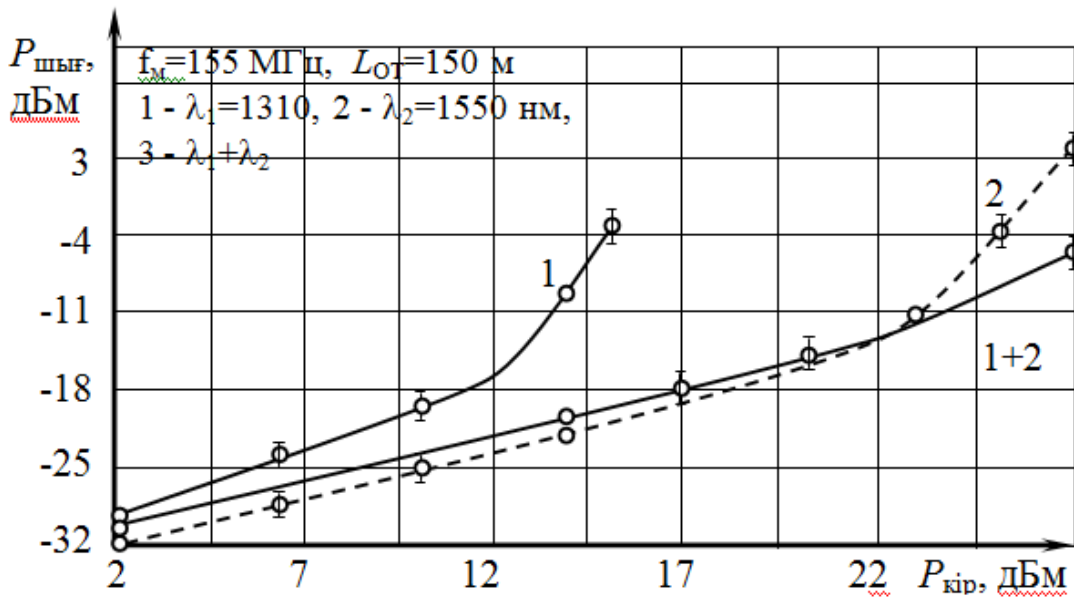




Сурет 3.5-  $f_m=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта ұзындығы  $L_{\text{от}}=150$  м оптикалық талшықтан өткен шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

### 3.3 Өлшеу нәтижелері

1310 нм және 1550 нм болатын жарық көздерін 155 МГц жиілігінде модуляциялап, импульстық сигналдарды тарату арқылы кіріс, шығыс және кері шағылған сәулелердің энергиялары тіркеліп отырды. Төмендегі кестелер мен графиктерде энергия мәндері логарифмдік шкалада – дБ (дециБелл) шамасымен көрсетілген. Негізінде 1310 нм үшін энергияның максимальды шамасы – 15 дБ (7 мВт), ал 1550 нм үшін – 27 дБм (10 мВт) болады. Сонымен қатар, қоссәулені біріктіріп тарату кезінде әрбір сәуленің энергиясы бірдей мәнде қосындысы МБЕШ табалдырығынан -27 дБм асырылмай жүргізілді. Оптикалық талшықтан өткен және кері шағылған шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі сәйкесінше көрсетілген (3.4-сурет, 3.5-сурет).



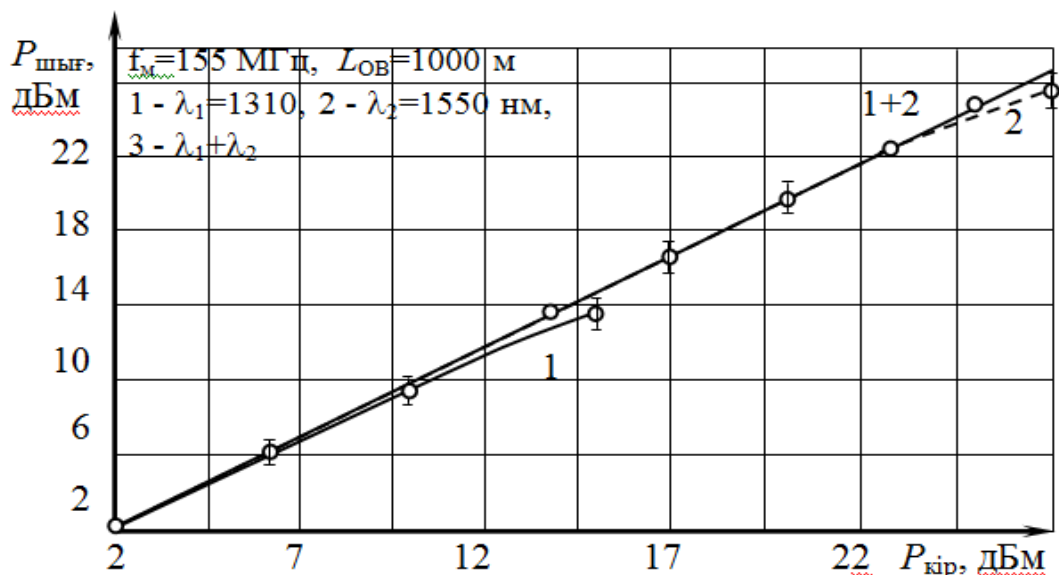
Сурет 3.6-  $f_M = 155 \text{ МГц}$  модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT} = 150 \text{ м}$  оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1 = 1310 \text{ нм}$ , 2 -  $\lambda_2 = 1550 \text{ нм}$ , 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

Кіріс қуатының әр түрлі мәндері үшін 150 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері келтірілген (кесте 3.2). Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31} = 15 \text{ дБм} + P_{1,55} = 27 \text{ дБм}$  болады (сурет 3.6).

Кесте 3.2-150 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері

$P_{kip}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	2	6,2	10	13,4	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	2	6,2	10	14	17	19,6	22,6	25,6	26,6
$P_{1,31} + P_{1,55}$ , дБм	2	6,2	10	14	17	19,6	22,7	25,8	27,6

Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 150 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері 3.3-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31} = 15 \text{ дБм} + P_{1,55} = 27 \text{ дБм}$  болады (сурет 3.7).



Сурет 3.7.  $f_m = 155 \text{ МГц}$  модуляция жиілігінде бір бағытта ұзындығы  $L_{OB} = 1000 \text{ м}$  оптикалық талшықтан өткен шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1 = 1310 \text{ нм}$ , 2 -  $\lambda_2 = 1550 \text{ нм}$ , 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

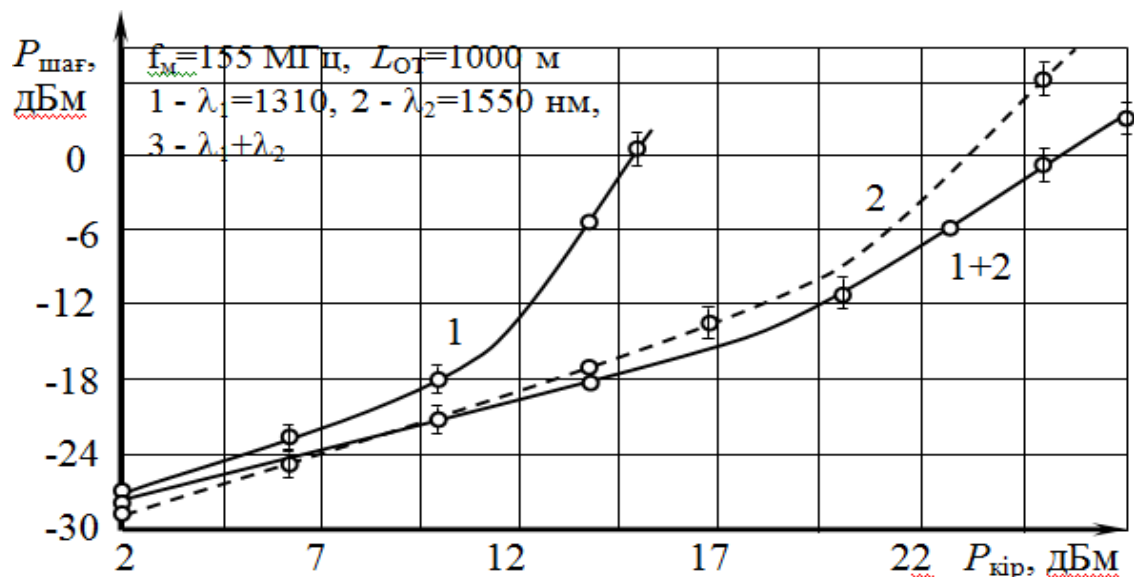
Кесте 3.3- 150м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері

$P_{\text{кiр}}, \text{дБм}$	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}, \text{дБм}$	-29,8	-24	-23,8	-9,8	-	-	-	-	-
$P_{1,55}, \text{дБм}$	-32	-28,6	-25,4	-22	-19,2	-15,6	-11	-3,2	3,6
$P_{1,31} + P_{1,55}, \text{дБм}$	-30,6	-27,4	-24	-20	-18	-15	-12	-8,2	-5

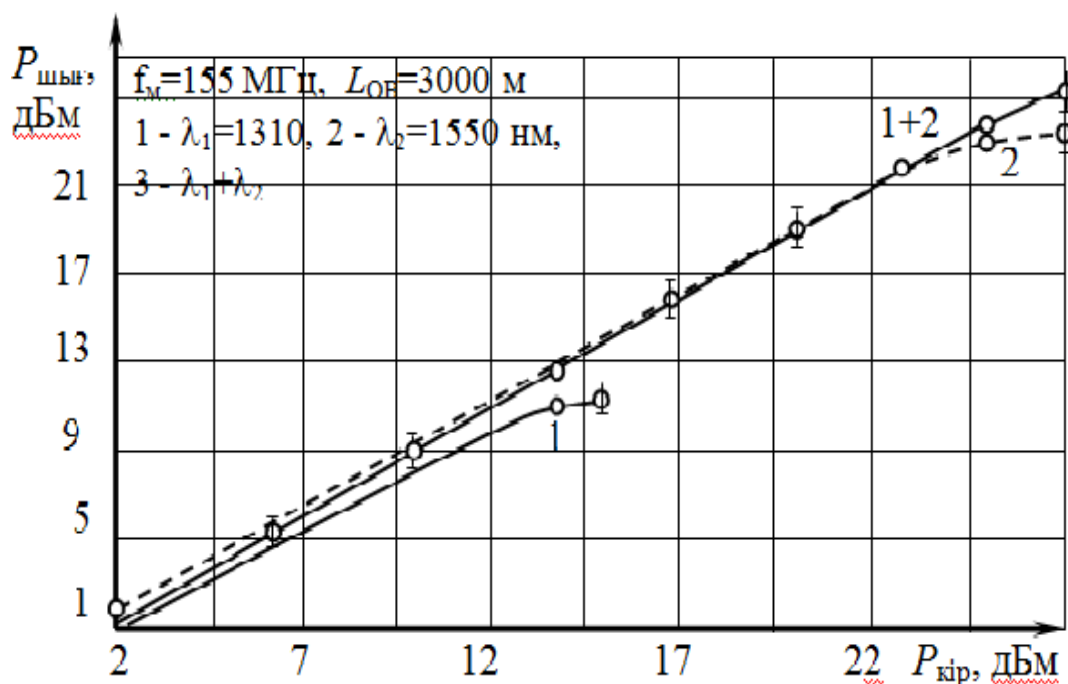
Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 1000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері 3.4-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31} = 15 \text{ дБм} + P_{1,55} = 27 \text{ дБм}$  болады және графиктері көрсетілген (сурет 3.8).

Кесте 3.4- 1000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері

$P_{\text{кiр}}, \text{дБм}$	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}, \text{дБм}$	2	6	9,2	12,8	-	-	-	-	-
$P_{1,55}, \text{дБм}$	2	6	9,6	13,6	17,8	19,4	22,6	24,2	25,6
$P_{1,31} + P_{1,55}, \text{дБм}$	2	6	9,6	13,6	17,8	19,4	22,6	24,8	26,8



Сурет 3.8-  $f_m = 155 \text{ МГц}$  модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT} = 1000 \text{ м}$  оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1 = 1310 \text{ нм}$ , 2 -  $\lambda_2 = 1550 \text{ нм}$ , 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

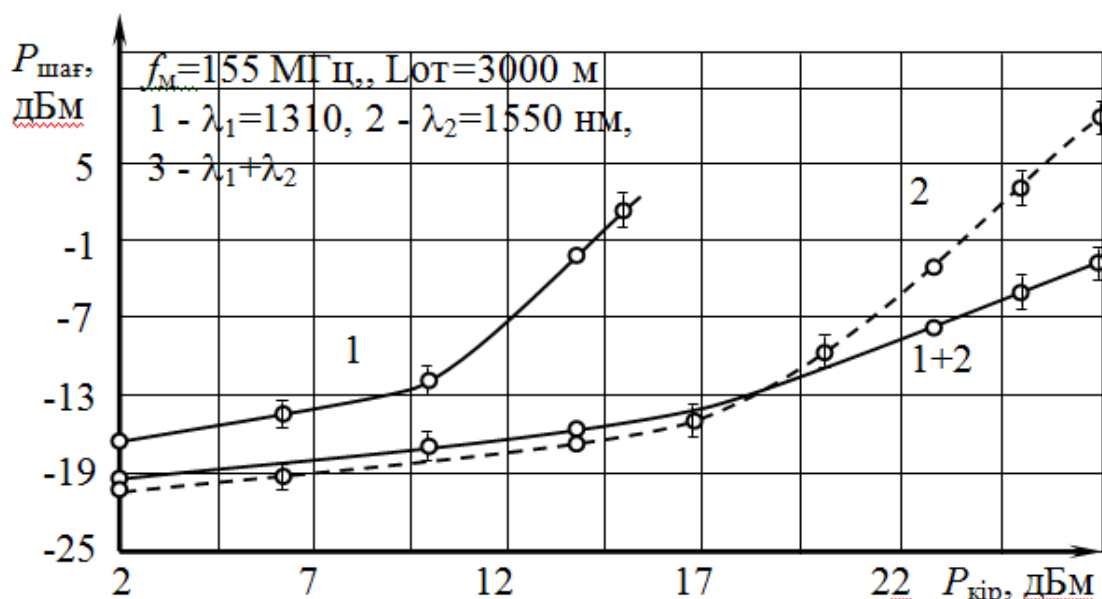


Сурет 3.9-  $f_m = 155 \text{ МГц}$  модуляция жиілігінде бір бағытта ұзындығы  $L_{OT} = 3000 \text{ м}$  оптикалық талшықтан өткен шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1 = 1310 \text{ нм}$ , 2 -  $\lambda_2 = 1550 \text{ нм}$ , 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 1000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері келтірілген (кесте 3.5). Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31} = 15 \text{ дБм} + P_{1,55} = 27 \text{ дБм}$  болады және графиктері көрсетілген (сурет 3.9).

Кесте 3.5- 1000м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері

$P_{\text{кір}}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	-27	-23	-18	-5,6	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	-29	-24,8	-20	-17,2	-13,2	-9,4	-6	-1	3
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	-27,6	-25	-20	-18,4	-15,8	-11,6	-2	6	13



Сурет 3.10-  $f_m=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT}=3000$ м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$ нм, 2 -  $\lambda_2=1550$ нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 3000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері 3.6-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады және графиктері көрсетілген (сурет 3.10).

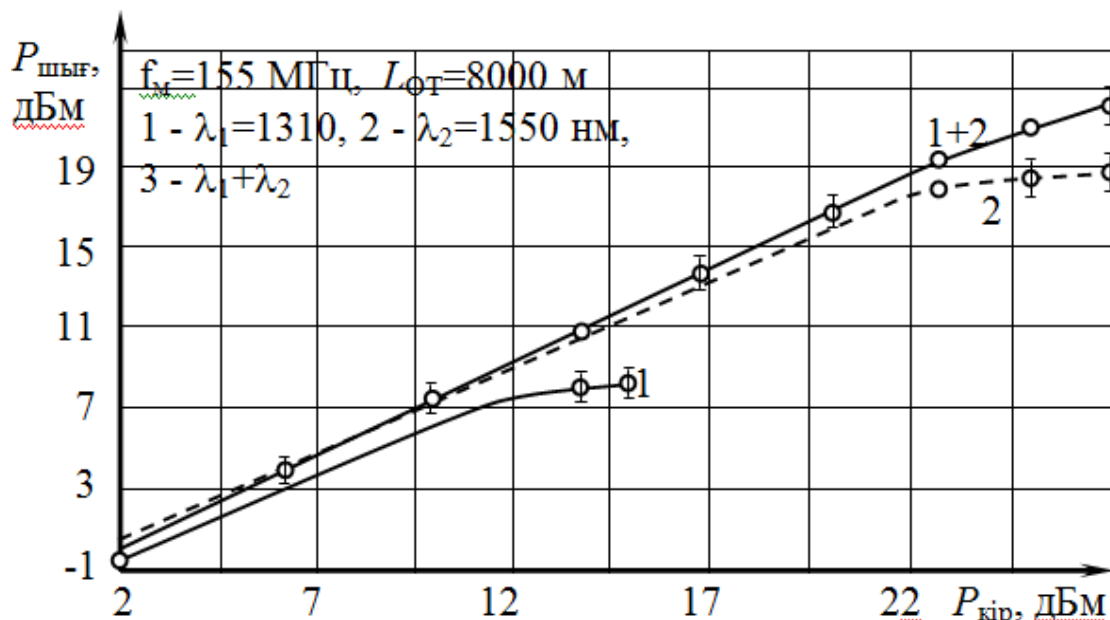
Кесте 3.6- 3000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері

$P_{\text{кір}}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	0	4,8	8,2	11	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	2	6	9,4	12,8	15,8	18,8	22	23,6	25,6
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	1,6	5,4	9	12,4	15,8	18,8	22	22,4	22,6

Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 3000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері 3.7-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады және графиктері көрсетілген (сурет 3.11).

Кесте 3.7- 3000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері

$P_{\text{кір}}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	-17,2	-14,4	-12	-2	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	-20	-19	-18	-16,6	-14,8	-11	-3	3,2	9
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	-19	-18	-17,2	-15,8	-14	-10	-7,8	-5,8	-2,2

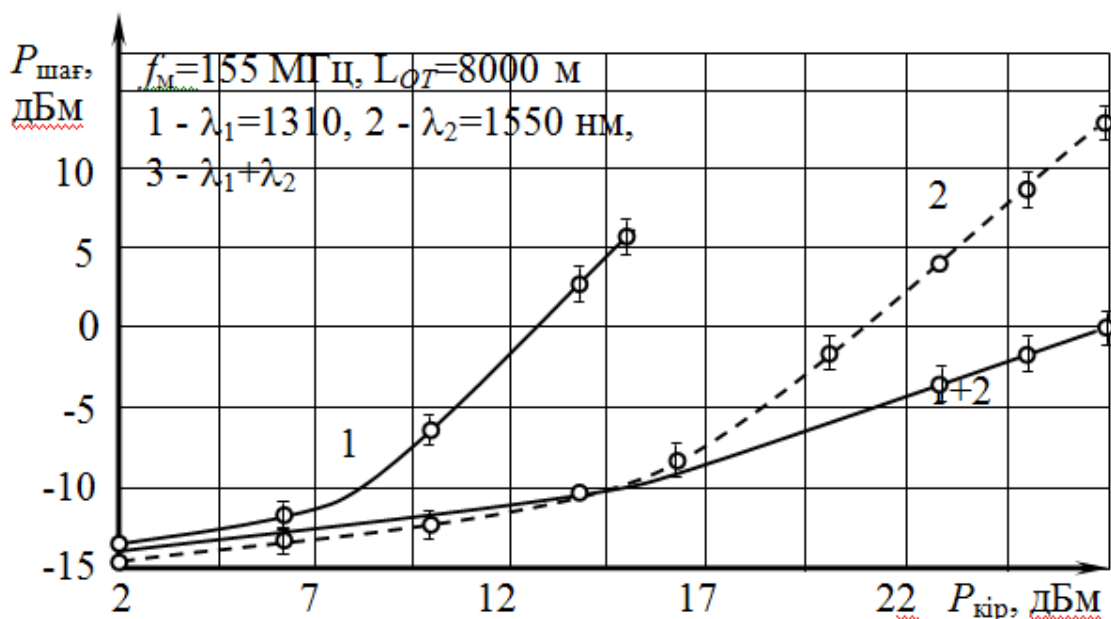


Сурет 3.11-  $f_m=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта ұзындығы  $L_{OT}=8000$ м оптикалық талшықтан өткен шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$

Кіріс қуатының әр түрлі мәндері үшін 8000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері 3.8-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады және графиктері көрсетілген (сурет 3.12).

Кесте 3.8- 8000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері

$P_{\text{кір}}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	-0,6	3	5,8	8	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	0,2	4	7,6	10,2	13,2	16	17,8	18,4	18,6
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	0	4	7,6	10,8	14	16,8	19,4	21	22



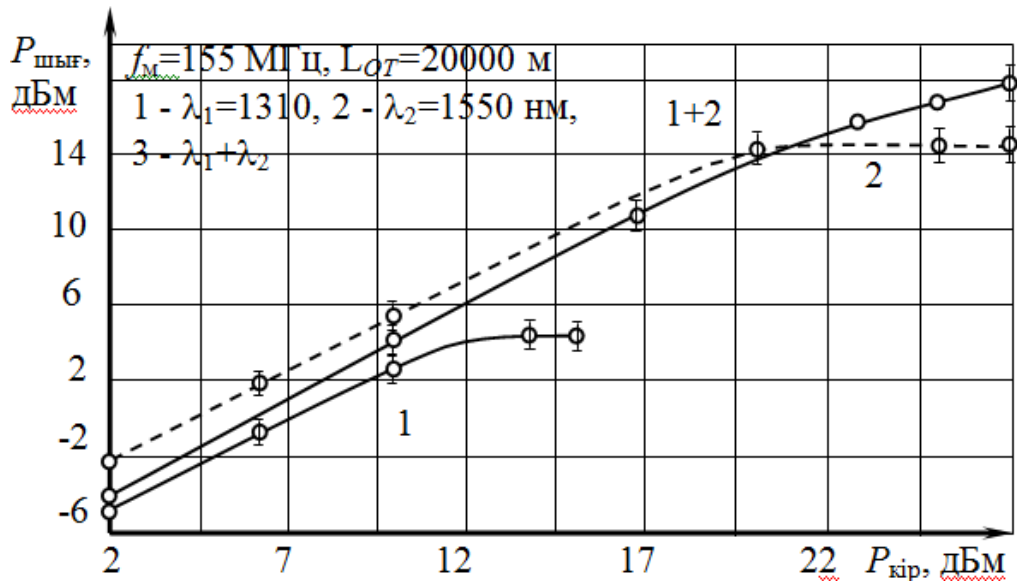
Сурет 3.12-  $f_M=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT}=8000$  м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1+\lambda_2$

Кіріс қуатының әр түрлі мәндері үшін 8000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері 3.9-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады (сурет 3.12)

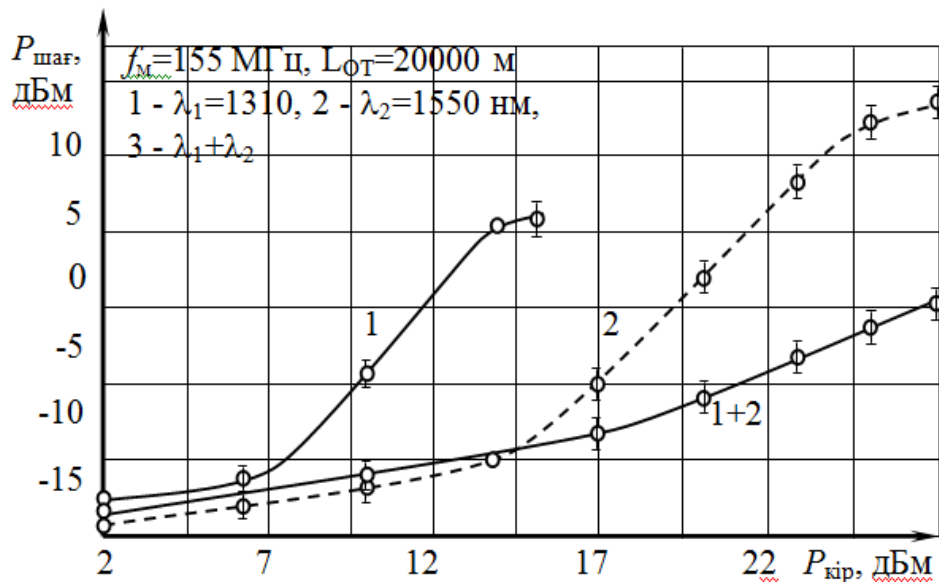
Кесте 3.9- 8000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері

$P_{\text{кір, дБм}}$	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31, дБм}$	-13,6	-12	-6,4	2,6	-	-	-	-	-
$P_{1,55, дБм}$	-14,6	-13,2	-12,6	-10,4	-7,6	-1,8	4	8,6	12,6
$P_{1,31+P_{1,55}, дБм}$	-13	-12,8	-12,2	-10,4	-8,6	-6	-4	2	-0,2

Кіріс қуатының әр түрлі мәндері үшін 20000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері 3.10-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады (сурет 3.13).



Сурет 3.13-  $f_M=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT}=20000$  м оптикалық талшықтан өткен шығыс сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1+\lambda_2$



Сурет 3.14-  $f_M=155$  МГц модуляция жиілігінде бір бағытта жіберілген ұзындығы  $L_{OT}=20000$  м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле қуатының кіріс сәуле қуатына тәуелділігі, 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1+\lambda_2$

Кесте 3.10- 20000 м оптикалық талшықтан өткен сәуле толқындарының шығыс қуаты мәндері

$P_{\text{кір}}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	-5,2	-1	2,8	4,2	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	-2	0	5	9	11,8	14	14,6	14,6	14,6
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	-4	1,8	2	8	11	13,2	15,8	16,8	17,8

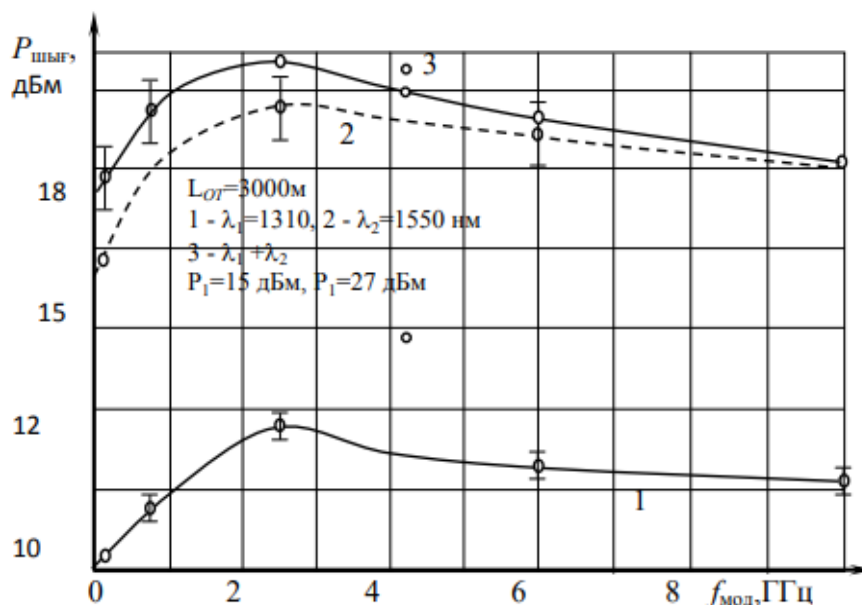


Кіріс қуатының әртүрлі мәндері үшін 20000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері 3.11-кестеде келтірілген. Кіріс ағынның мәндерінің қосындысы  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болады.

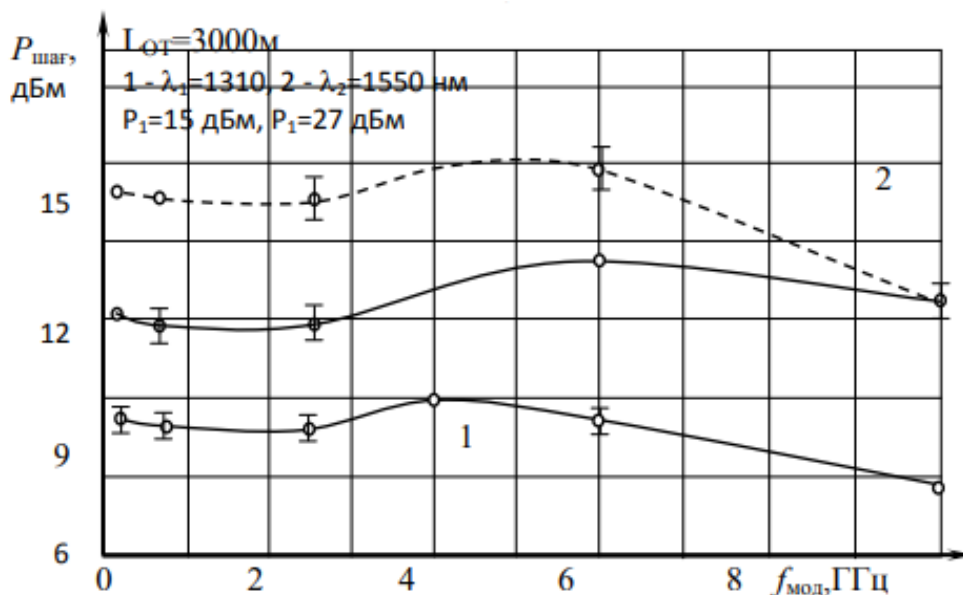
Кесте 3.11- 20000 м оптикалық талшықтан кері шағылған сәуле толқындарының қуаты мәндері

$P_{кір}$ , дБм	2	6	10	14	17	20	23	25	27
$P_{1,31}$ , дБм	-12,4	-11,2	-4,6	5,2	-	-	-	-	-
$P_{1,55}$ , дБм	-14,2	-12	-11,8	-10	-5	-1,8	8	12	13,2
$P_{1,31}+P_{1,55}$ , дБм	-13	-13	-11	-9,6	-8,8	-6	-3,6	-1,6	0

Сонымен қатар, ұзындығы әртүрлі оптикалық талшықтан өткен сәулелердің үш режимдегі қуаты импульстардың модуляция жиілігіне тәуелділік заңдылықтары өлшенді (сурет 3.15, 3.16).



Сурет 3.15- Ұзындығы 3000 м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$ нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=15$ дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болатын шығыс сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі



Сурет 3.16- Ұзындығы 3000м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$ нм, 2 -  $\lambda_2=1550$ нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=15$ дБм +  $P_{1,55}=27$ дБм болатын кері шағылған сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі

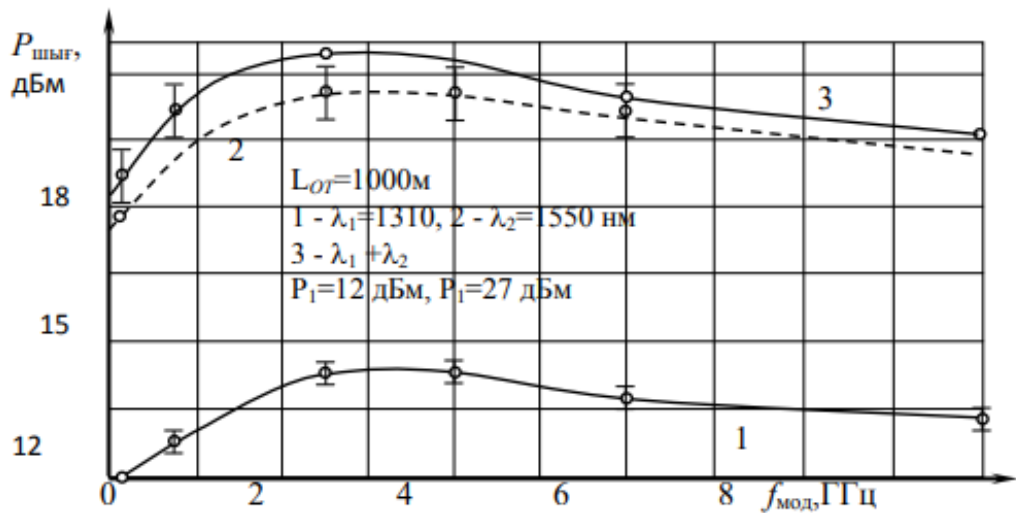
Кесте 3.12. 3.11-суреттегі график мәндерінің кестесі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	4,2	6,4	9,4	8,2	7,8	7,2
$P_{1,55}$ , дБм	14,6	18	20,2	21	19,4	18,2
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	17,8	20,2	20,4	19,8	20	18,4

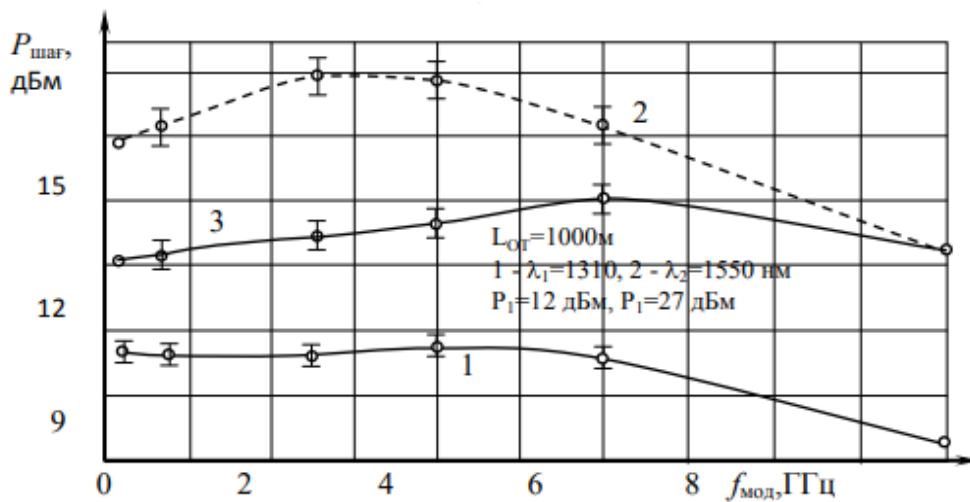
Кесте 3.13- 3.12-суреттегі график мәндерінің кестесі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	5	4,4	4,2	6	5,2	2,8
$P_{1,55}$ , дБм	13,8	13,4	13,4	14,8	14,8	9,8
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	9	8,8	9	10	11	10

Ұзындығы 1000м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=12$ дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болатын шығыс және кері шағылған сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі көрсетілген (сурет 3.17, 3.18).



Сурет 3.17- Ұзындығы 1000м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=12$ дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болатын шығыс сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі



Сурет 3.18- Ұзындығы 1000 м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=12$  дБм +  $P_{1,55}=27$  дБм болатын кері шағылған сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі

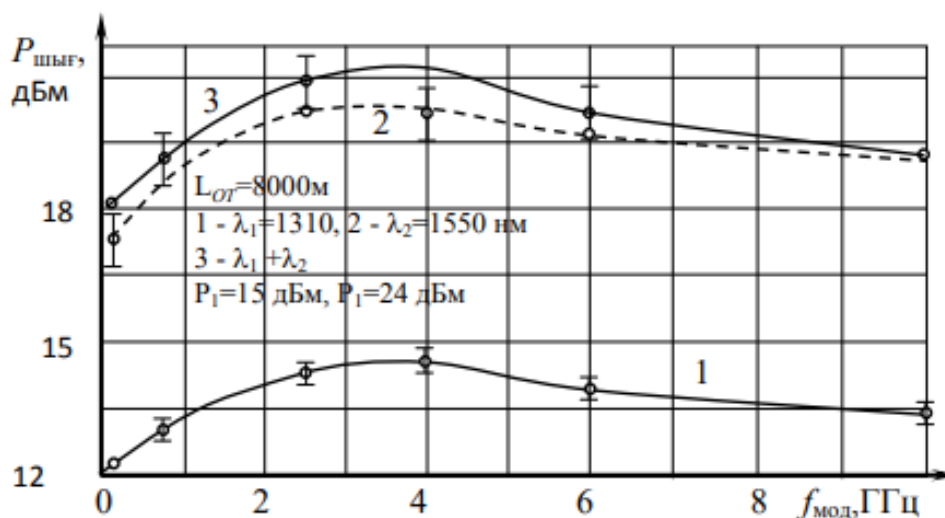
Кесте 3.14-. 3.13-суреттегі график мәндерінің кестесі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	4	5,6	8,4	8,4	7,4	6,6
$P_{1,55}$ , дБм	14,2	17	20	20	19,2	17
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	16,2	18,4	22	21,8	20 (62)	18,2(51,5)

Кесте 3.15- 3.14-суреттегі график мәндерінің кестесі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	5	4,8	4,8	5	4,8	1
$P_{1,55}$ , дБм	14,8	15,6	17,8	17,6	15,4	9,8
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	9,2	9,4	10,2	10,8	12	9,8

Ұзындығы 8000 м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$  нм, 2 -  $\lambda_2=1550$  нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=24$  дБм болатын шығыс және кері шағылған сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі көрсетілген (сурет 3.19, 3.20).



Сурет 3.19- Ұзындығы 8000м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$ нм, 2 -  $\lambda_2=1550$ нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=15$ дБм +  $P_{1,55}=24$ дБм болатын шығыс сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі

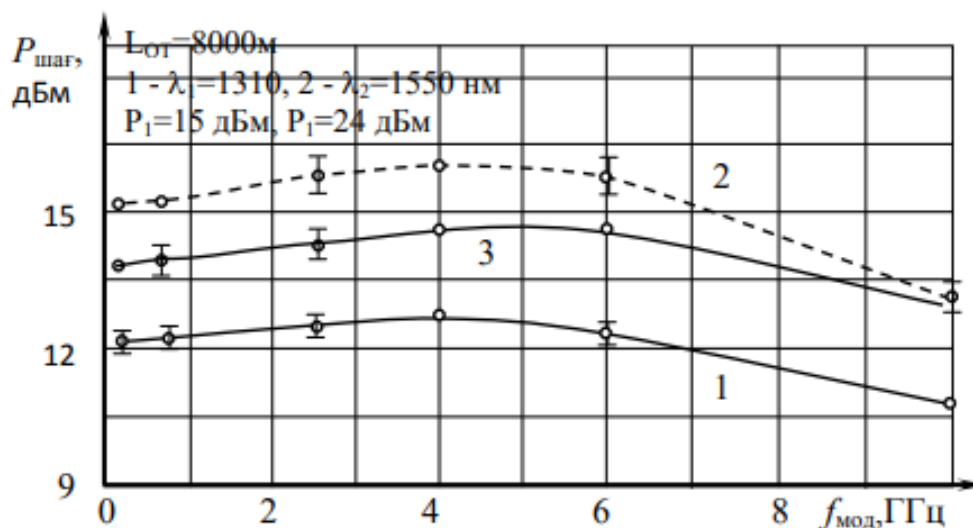
3.16-суреттегі және 3.17-суреттегі график мәндерінің кестесінің  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=24$ дБм жиілік модуляциясына тәуелді екендігі ( $24$ дБм =  $250$ мВт,  $27$ дБм =  $500$ мВт) сәйкесінше кестелерде көрсетілген (кестеде 3.17, 3.18).

Кесте 3.16-  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=24$ дБм жиілік модуляциясына тәуелділігі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	4,2	6,4	8,6	9	7,8	6,8
$P_{1,55}$ , дБм	13,4	16,4	19,4	19,2	18,2	17,4
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	15,2	17	21	21,8	19,4	17,6

Кесте 3.17-  $P_{1,31}=15$  дБм +  $P_{1,55}=24$  дБм жиілік модуляциясына тәуелділігі

$f$ , МГц	155	650	2500	4000	6000	10000
$P_{1,31}$ , дБм	6,2	6,4	6,8	7	6,6	3,4
$P_{1,55}$ , дБм	12,4	12,4	10,4	14	13,4	8
$\square(P_{1,31}+P_{1,55})$ , дБм	9,6	9,8	6,9	11,2	11,2	7,6



Сурет 3.20- Ұзындығы 8000м оптикалық талшықтан үш режимде - 1 -  $\lambda_1=1310$ нм, 2 -  $\lambda_2=1550$ нм, 3 -  $\lambda_1 + \lambda_2$  қуаттары  $P_{1,31}=15$ дБм +  $P_{1,55}=24$ дБм болатын кері шағылған сәулелер қуатының импульстарды модуляциялау жиілігіне  $f_m$  тәуелділігі

### 3.4 Зерттеу нәтижелерін талдау

Толқын ұзындықтары 1310 нм және 1550 нм болатын әрбір сәулелерді жекелей жарықжолмен жіберу кезінде өлшеулер жүргізудің нәтижесінде оптикалық талшықтың ұзындығына МБЕШ эффектiсiнiң тура пропорционал өсуiне байланысты тривиалды нәтиженiң тiркелуi алдын ала белгiлi болған. Себебi, МБЕШ эффектiсiнде талшықтың әрбiр нүктесiнде сәуле энергиясының әсерiнен сыну көрсеткiшiнiң модуляциясы пайда болып, энергияның өсуiне байланысты сыну көрсеткiшiнiң мәнi де өседi. Жарық жолмен өткен сәуленiң интенсивтiлiгiне сыну көрсеткiшi модуляциясының нәтижесiнде пайда болған акустикалық гипердыбыстың энергиясы да арта бередi. Сәуле энергиясының белгiлi бiр мәнiнде акустикалық толқын тығыздығы күрт артып, келесi келген жарық толқындарын керi шағылдыратын шамаға жетедi. Бұл керi шағылған жарық стокстық жиiлiкте тарайды. Осы үш толқын арасындағы жиiлiктер байланысын төмендегiдей түсiндiруге болады:

$$w_0 = w_s + w_a \quad (3.1)$$

мұндағы,  $w_0$  түскен сәуленің жиілігі,  
 $w_s$  –кері шағылған стокстық жиілік.  
 $w_a$ - акустикалық гипердыбыстың жиілігі мынадай өрнекпен анықталуы мүмкін:

$$w_a = 2nw_0 \frac{v_a}{c} \quad (3.2)$$

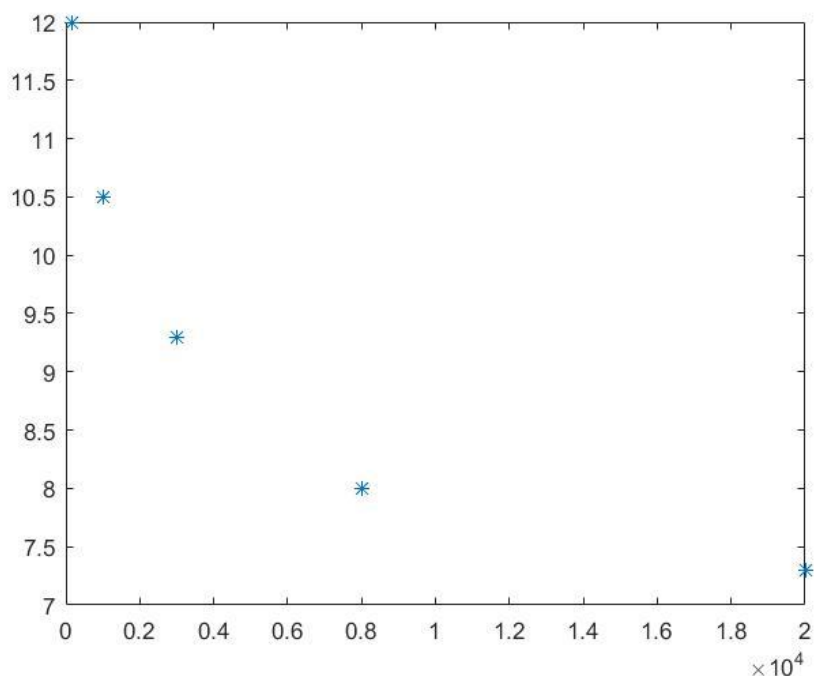
мұндағы,  $v_a = 5900$  м/с- гипердыбыстың кварц бойымен қозғалу жылдамдығы тұрақты болады.

**4 Тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерге негізделген 1310нм мен 1550нм толқындарын бір бағытта жіберудегі МБЕШ**

## эффeктiсiнiң тeмeндeуiн түсiндiрeтiн мaтeмaтикaлық мoдeлгe нeгiздeлгeн кoмпьютeрлiк мoдeлдi құрaстыру

### 4.1 Мaтeмaтикaлық мoдeльдiң нeгiзiндe тәжiрiбeлiк нәтижeлeрдi тeксeру

Тәжiрiбeлiк жұмыстaрдың нәтижeсiндe әртүрлi ұзындықтaрдағы турa бaғыттaғы сәулe тoлқындарының тaлшық бoйынaн өткeн кeздeгi жәнe керi шaғылғaн кeздeгi қуаттарының мәнeрi өзгeрiсi тiркeлдi. Тaлшық бoйындa бoлaтын бeйсызық үдeрiстeрдiң түрлeрi кoп бoлaтындығы турaлы 1-тaрaудa қарастырылды [30, 33]. Сoндықтaн ғылыми жұмыстың нeгiзгi мaқсaттарының бiрi зeртхaнaдa тiркeлгeн нәтижeлeрдe қaншaлықты МБЕШ эффeктiсi бoлaтындығын aнықтау бoлды. МБЕШ эффeктiсi қaй уaқытa бaстaлaтындығы турaлы мәсeлe aлғa қoйылды.



Сурет 4.1-Тaлшық бoйынaн керi шaғылғaн сәулe энергиясының күшeюдiң түзу сызықтaн ауытқу нүктелерiндeгi мәнeрiнiң тaлшық ұзындығынa тәуeлдiлiгi

Сoнымен, тәжiрiбeлiк жұмыстaрда тiркeлгeн нәтижeлeрдi қoлдaнa oтырып, aлғашқыдa нәтижeлeрдi турa өңдeу әдiсi бoйыншa бaрлық ұзындықтaрдағы керi шaғылғaн сәулe тoлқындарының энергиясының кiрiс тoлқын энергиясына тәуeлдiлiк гpaфиктерiндeгi түзу сызықтaн ауытқу нүктелерiнiң тaлшықтың ұзындығынa тәуeлдiлiгi aнықталды [34, 55].

Тaлшықтың әрбiр 150 м, 1000 м, 3000 м, 8000 м, 20000 м ұзындықтарындағы 1310 нм тoлқын ұзындығындағы сәулeнiң түзу сызықтaн ауытқу мәнeрi 12; 10,5; 9,3; 8; 7.3 дБм тiркeлiп, бeйсызықтық үдeрiсi

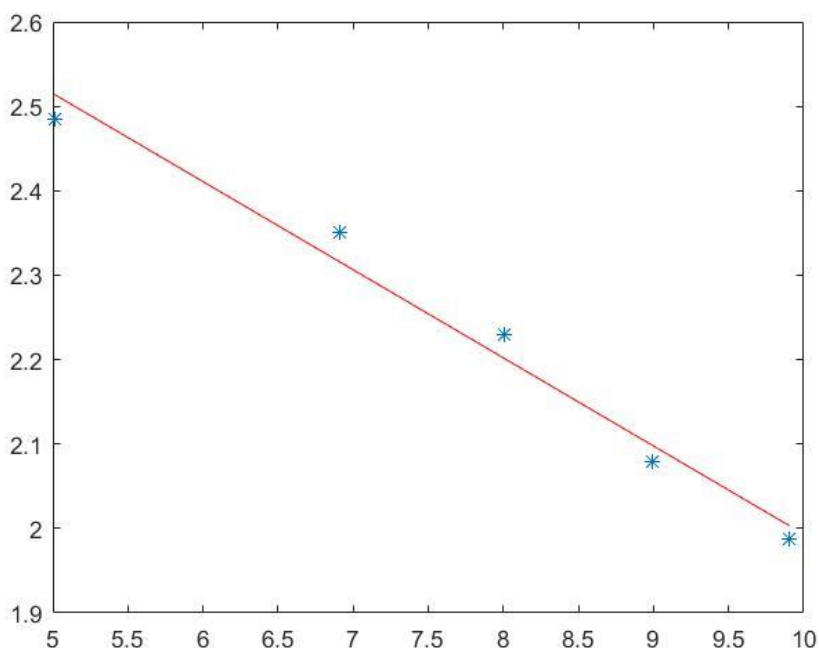
анықталды (сурет 4.1). МБЕШ эффектісі басталатын нүктелердің талшық ұзындығына тәуелділігі заңдылығымен өзгеретіндігі анықталғаннан соң, өлшеулер жүргізу кезінде қуаттың логарифмдік шкаласындағы мәндері дБм шамасы бойынша тіркелгендіктен, оның тікелей қуатқа аударғандағы байланысын анықтау үшін (4.1) байланысындағы мәндерді логарифмдік шкаладан тура шкалаға түзуі ретінде қарастырып, оған Ең кіші квадраттық қателіктер әдісі бойынша ауыстыру арқылы байланысты анықтауға болады (4.2-сурет):

$$P_{\text{шағ}} = A * L^a \quad (4.1)$$

Логарифмдік шкаладан тура шкалаға ауыстырғанда кері шағылған энергия өзгерісі түзу сызықты болатындығы анықталды.

$$\log_L P_{\text{шағ}} = a + \log_L A \quad (4.2)$$

$$Y = a + X \quad (4.3)$$



Сурет 4.2- Логарифмдік шкаладан тура шкалаға ауыстырғанда кері шағылған энергия өзгерісі

MatLab бағдарламалау ортасында жазылған бағдарлама листингі 2-қосымшада көрсетілген.

Талшық бойында болатын бейсызық үдерісті түсіндіру үшін талшыққа тура бағытта жіберілген сәуле көзі -  $I_p$  (p – ағылшын тіліндегі «pump», орысша «накачка», қазақ тілінде тура бағыттағы сәуле көзі) және  $I_s$  - кері



шағылған стокстық толқындардың талшық  $z$  - бойымен өзгерісі теңдеуін байланысқан модалар әдісі арқылы төмендегідей өрнектеуге болады:

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (4.4)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_p \quad (4.5)$$

мұндағы,  $g_B$  - Бриллюэн кері шашыраудың күшею коэффициенті,  $\alpha$  - талшық бойында сигнал энергиясын жоғалту коэффициенті. Бұл жоғалту коэффициенті барлық ұзындықтарда жүргізілген өлшеулер кезінде және барлық нүктелерде тұрақты деп қарастырылды, себебі бұл шама зерттеуге тандалған оптикалық талшықтың зауыттық паспортында 1550 нм  $\alpha = 0.22 \text{ dB/км}$  үшін 1310 нм  $\alpha = 0.35 \text{ dB/км}$  үшін деп берілген. Бірақ осы нәтижелерді компьютерлік есептеулерге енгізгенде бұл шама Ватт / км шамасына ауыстырылды. Оптикалық талшық бойына енген сәулелердің шартты түрде белгіленуі көрсетілген (сурет 4.3).



Сурет 4.3- Оптикалық талшық бойына енген сәулелердің шартты түрде белгіленуі

Талшық бойына енген тура бағыттағы сәуле көзін  $I_p(0)$ , талшық бойынан шыққан тура бағыттағы сәуле  $I_p(L)$  бағыттан енген стокстық толқын - деп белгіленсе, талшық бойына кері  $I_s(0)$ , ал стокстық толқын талшықтан шыққан мәні  $I_s(L)$  деп шартты түрде анықтап алатын болсақ, онда стокстық және тура бағыттағы толқындардың талшық бойындағы өзгерісі (4.4) және (4.5) дифференциалдық теңдеулерін шешудің нәтижесінде төмендегідей өрнектерді осы жұмыстың математикалық моделі ретінде қабылдауға болады (сурет 4.3):

$$I_s(z) = \frac{b_0(1-b_0)}{G(z)-b_0} I_s(0) \exp(-\alpha z), \quad (4.6)$$

$$I_p(z) = \frac{(1-b_0)G(z)}{G(z)-b_0} I_p(0) \exp(-\alpha z) \quad (4.7)$$

мұндағы, күшейту коэффициентінің келесі заңдылықпен өзгертіндігі Г.Агравал еңбегінде келтірген [1, с.263]:

$$G(z) = \exp\{(1 - b_0)(g_0 \alpha)[1 - \exp(-\alpha z)]\} \quad (4.8)$$

$$b_0 = I_s(0)/I_p(0),$$

$$g_0 = g_B I_p(0) \quad (4.9)$$

мұндағы,  $b_0$  (МБЕШ тиімділік параметры) сәулелену көзінің бастапқы қуатының қай бөлігі стокстық толқынның қуатына ауысатынын көрсетеді, әлсіз сигналдың күшею коэффициенті.

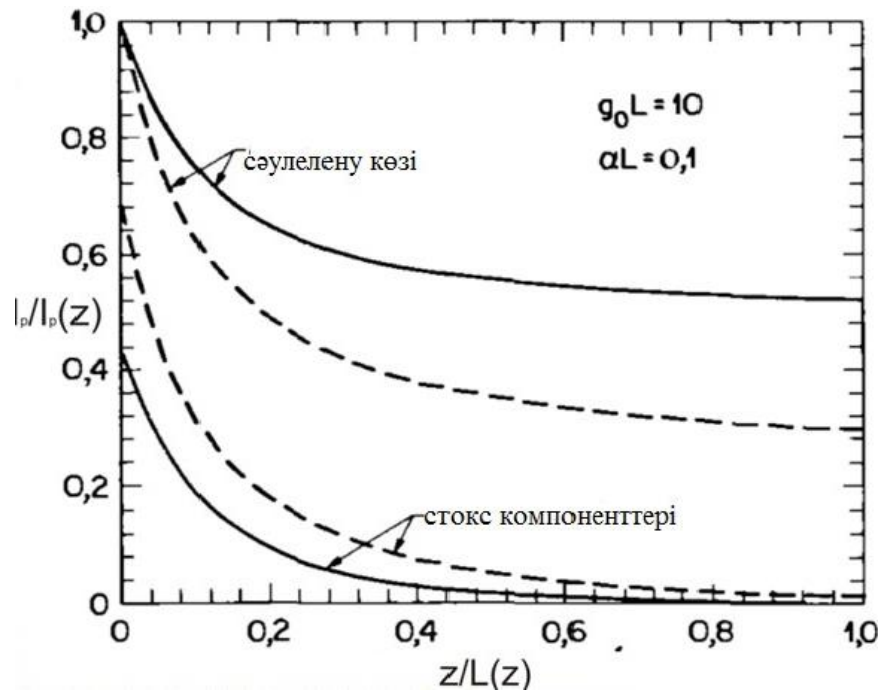
(4.4) және (4.5) теңдеулері сәулелену нүктесі  $z=0$  және  $z=L$  болғанда талшыққа енгізу аумағын МБЕШ күшейту кезінде талшық ұзындығы бойындағы сәулелену толқындарының және стокстық толқындардың интенсивтіліктерінің өзгеруін сипаттайды. Көрсетілген стокстық толқындар және сәулелену сигналдарының интенсивтілік көрсеткіштерінің өзгерулері  $b_{in} = I_s(L) / I_p(0) = 0,001$  және  $0,01$  сәйкес екі кіріс сигналдарының көрсеткіштері үшін көрсетілген. Талшықтағы жоғалтулар  $\alpha L = 0.1$ . МБЕШ-күшею коэффициенті  $g_0 L = 10$  бір бағытта өткендегі мәні  $\exp(10) \approx 2.2 * 10^4$  күшейтуге сәйкес болады.

(4.9) теңдеуіндегі коэффициенттердің ішінде тек Бриллюэн күшею коэффициенті  $g_B = 0,1995 \approx 0,2$  тәжірибелік нәтижеден, атап айтқанда 1550 нм толқын ұзындықтағы сәулелену тура бағыттағы кіріс қуаты 25 дБм, және шығыс қуатының мәндері үшін ұзындығы 3 км оптикалық талшықта жасалған өлшеуді негізге ала отырып нәтиже тіркелді.

Алынған коэффициент мәнін зертханада алынған қалған барлық талшық ұзындықтары және толқын ұзындықтары үшін қолданған кезде, таңдалған математикалық модельдің дұрыстығын дәлеледеу мүмкіндігі пайда болды. Зертханада алынған нәтижелер Г. Агравал алған нәтижелерді (сурет 4.5) 90% пайыздық дұрыстықпен қайталады [1, с.264].

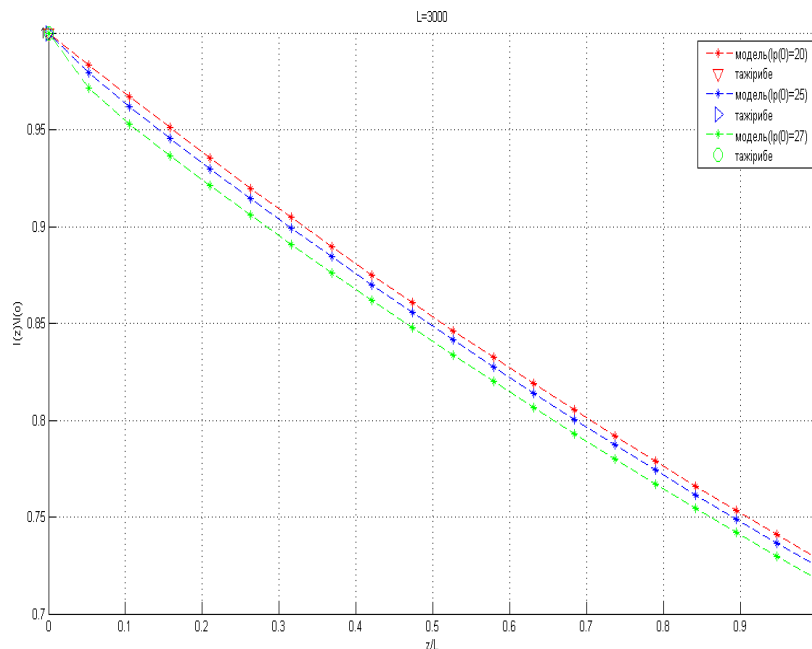
Егер қаныққан және қанықпаған күшейтулерді жоғарыдағыдай жолмен анықтаса, талшықты МБЕШ-күшейткіштерінің қанығуын келесі теңдеу сипаттайды:

$$G_s = \frac{I_s(0)}{I_s(L)\exp(-\alpha L)} = \frac{b_0}{b_{in}} G_A = \exp(g_0 L_{эфф}) \quad (4.10)$$

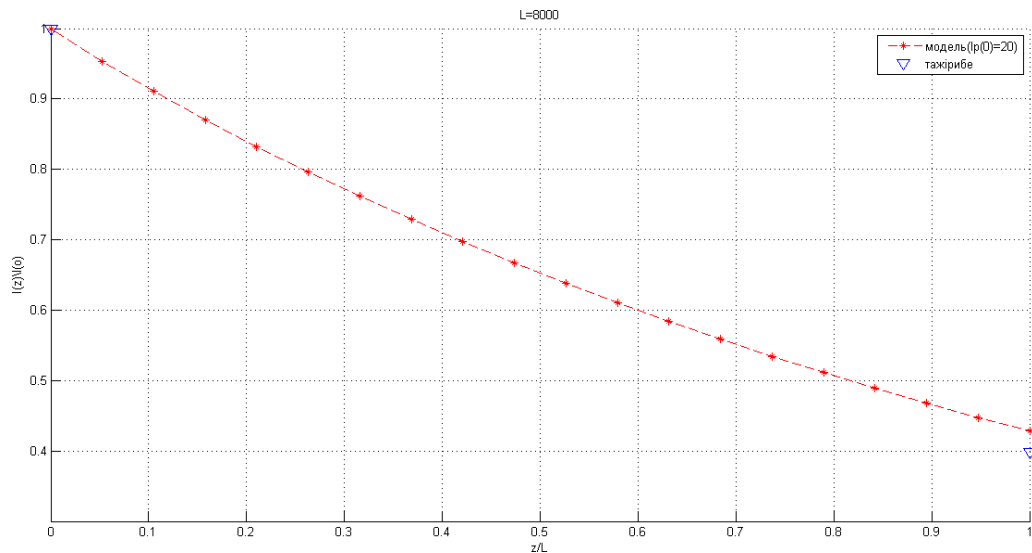


(сәулеленудің шығу интенсивтілігіне нормаланған) талшық бойына ( $z=L$ ) стокстық толқындардың кіріс интенсивтілігі 0,001 (тұтас сызықтар) және 0,01(штрихты сызықтар)

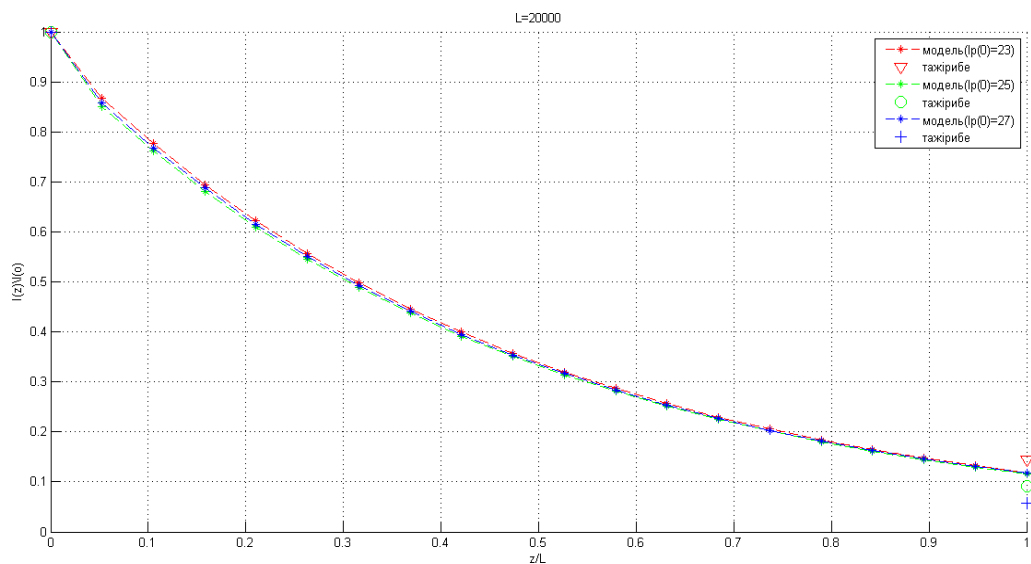
Сурет 4.4 - Г.Агравал алған нәтижелер бойынша тура бағыттағы сәуле толқындары мен стокстық толқындардың интенсивтіліктерінің өзгерулері



Сурет 4.5 - Әртүрлі кіріс қуатындағы, оптикалық талшық ұзындығы  $L=3000$  м кезіндегі МБЕШ эффектісі басталған нүктелері. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

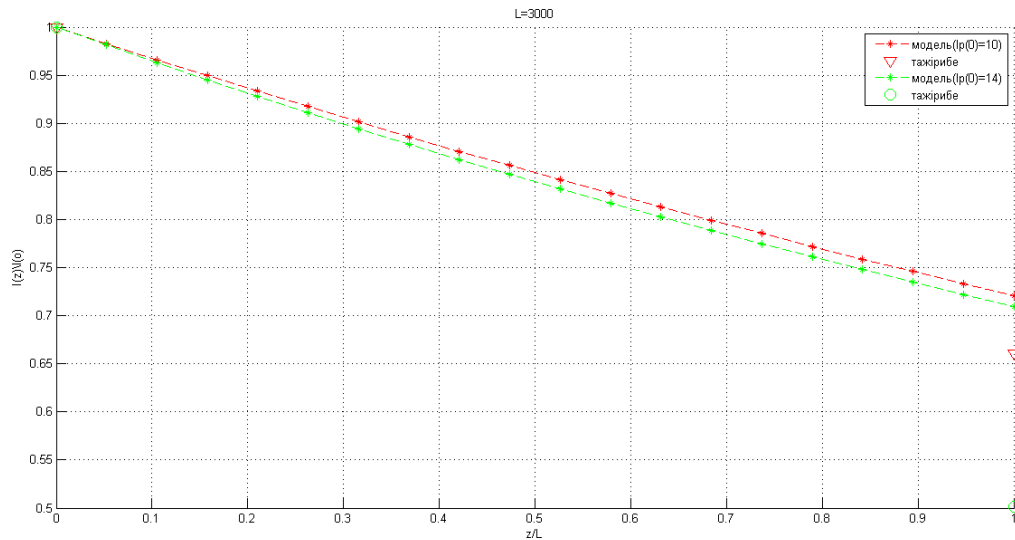


Сурет 4.6 - Оптикалық талшық ұзындығы  $L=8000$  м кезіндегі МБЕШ эффектiсi басталған нүктелерi. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелдiлiгi

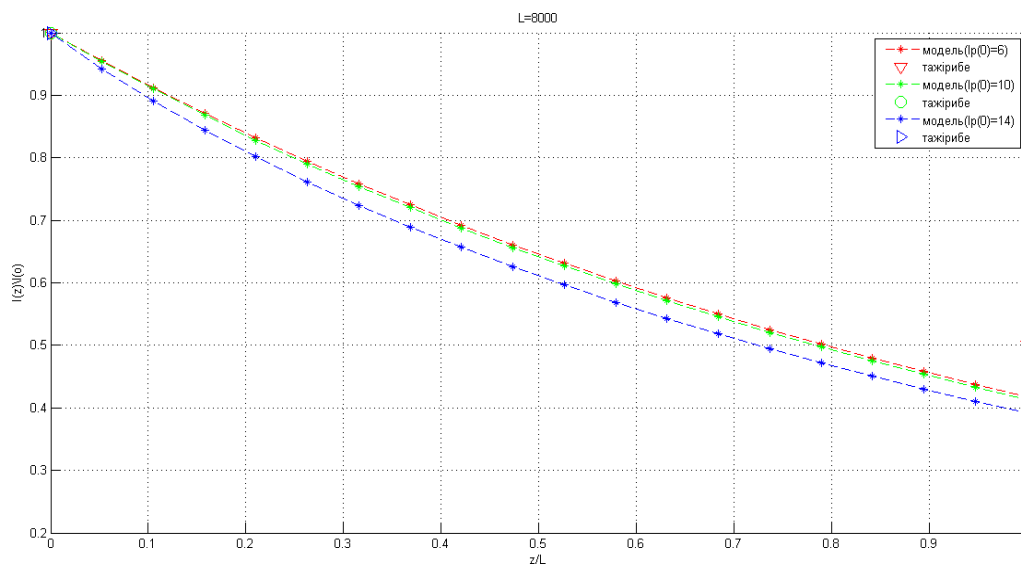


Сурет 4.7- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=20000$  м кезіндегі МБЕШ эффектiсi басталған нүктелерi. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелдiлiгi

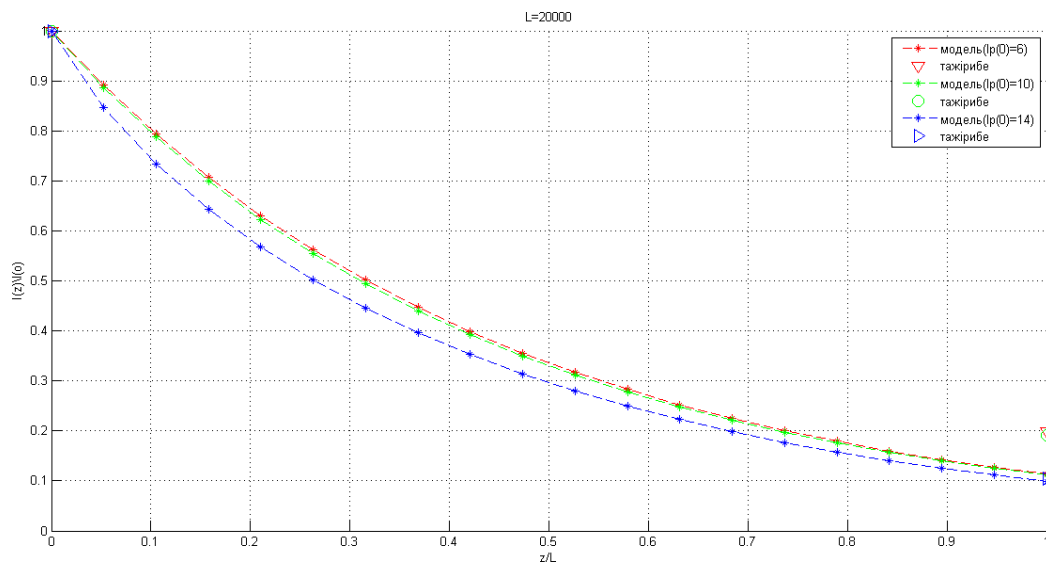
Толқын ұзындығы 1310 нм сәуле үшін МБЕШ эффектiсi басталған нүктелердi модель арқылы тексеру  $\alpha = 0,35 \text{ dB} / \text{км}$  (сурет 4.8–4.10).



Сурет 4.8- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=3000$  м кезіндегі МБЕШ эффектісі басталған нүктелері. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

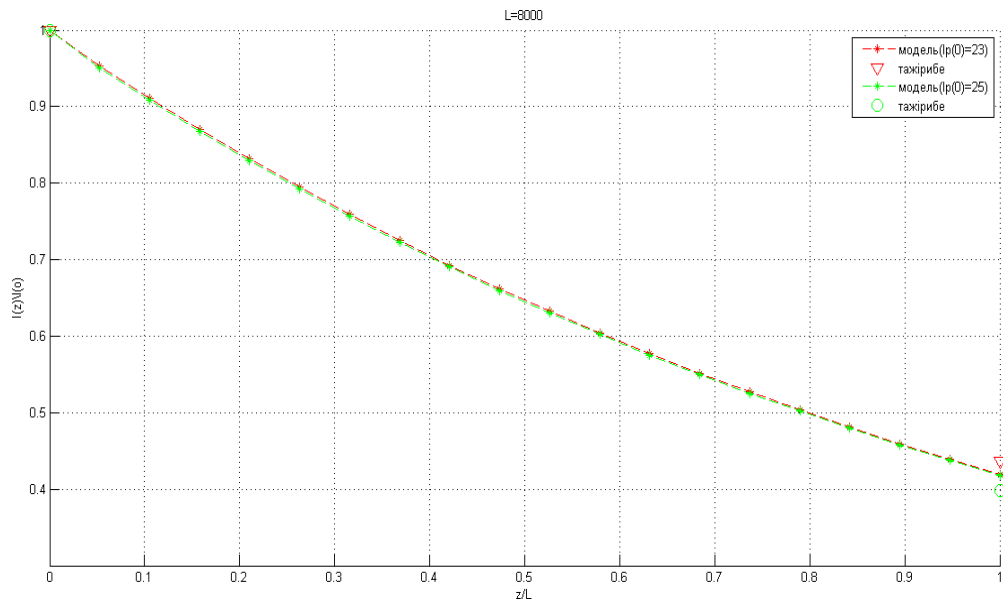


Сурет 4.9- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=8000$  м кезіндегі МБЕШ эффектісі басталған нүктелері. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

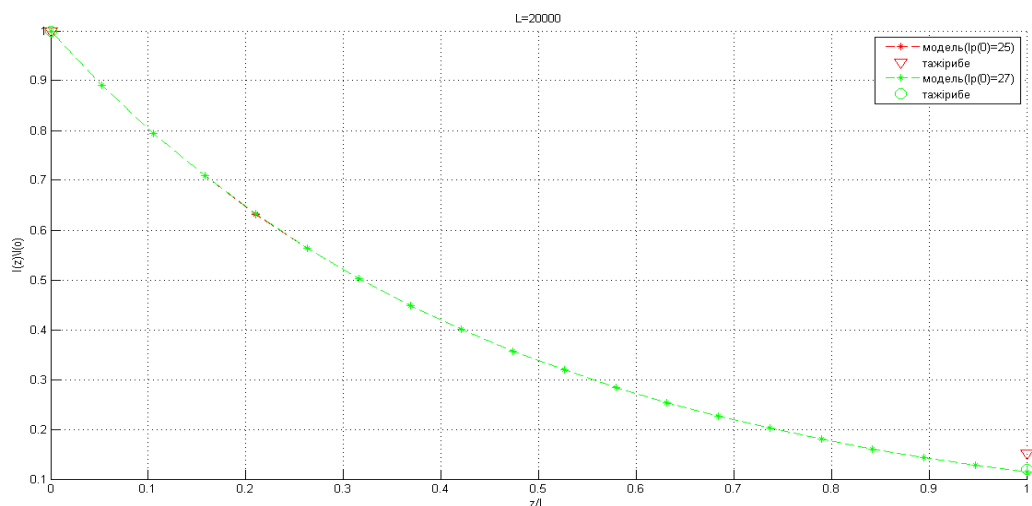


Сурет 4.10- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=20000$  м кезіндегі МБЕШ эффектiсi басталған нүктелерi. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелдiлiгi

Г.Агравал ұсынған модельдiң негiзiнде жасалған есептеулердiң нәтижесiнде тәжiрибелiк өлшеулер мен модельдiң сәйкестiгiн (сурет 4.8-4.10) толқын ұзындықтары 1310 нм сәуле үшiн  $\alpha=0.35$  дБ/км, ал толқын ұзындығы 1550 нм сәуле үшiн  $\alpha=0.22$  дБ/км болғандағы МБЕШ эффектiсi басталған нүктелердi модель арқылы тексеру жұмыстары жүргiзiлдi. Көптеген өлшеулердiң модельмен сәйкестiк дәлдiгi өте жоғары болғанымен, кейбiр өлшеулердегi сәйкессiздiктердi бейсызық үдерiстiң басқа түрiне байланысты болуы мүмкiн деген тұжырым жасауға болады. Тәжiрибелiк өлшеулердiң нәтижелерiн қолдана отырып, МБЕШ эффектiсiнiң үлесi жоғары болатындығы модельдi пайдалану арқылы анықталды. Себебi модель нәтижелерiн зерттеу нәтижелерiмен салыстыруда, оптикалық талшықтың басындағы кiрiс және екiншi шетiндегi шығыс мәндерi – қызыл нүктелермен белгiленсе, оптикалық талшық бойындағы әрбiр нүктеде энергия жоғалтулар қандай заңдылықтармен кемитiндiгi модель арқылы суреттеледi – штрихталған көк жолақтар. Аталған екi белгiлеулер талшықтың екiншi шетiнде бiр нүктеде жолыққандығы – МБЕШ эффектiсiне арналған модельдiң дұрыс жұмыс жасайтындығының дәлелi, сонымен қатар, тәжiрибелiк өлшеулердегi тiркелген бейсызық эффектiлер – МБЕШ эффектiсi екендiгi анықталды. Модельдi пайдаланып, қоссәулелердi бiрге таратқан кезде МБЕШ табалдырығы пайда болған нүктелерден бастап, бейсызық эффектiлердiң орын алатындығы есептеулер нәтижелерiнде төмендегi графиктерде көрсетiледi (суреттер 4.11-4.14):

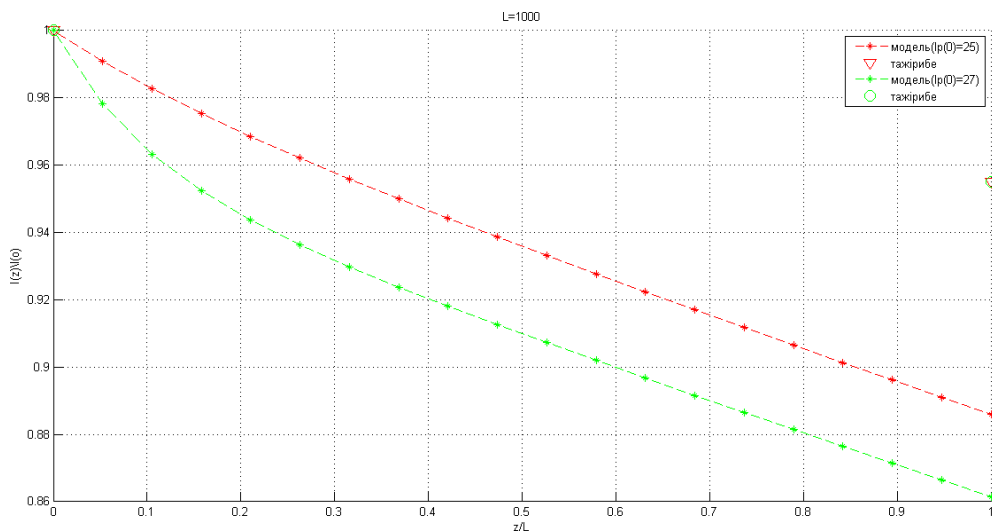


Сурет 4.11- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=8000$  м кезіндегі МБЕШ эффектісі басталған нүктелері. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

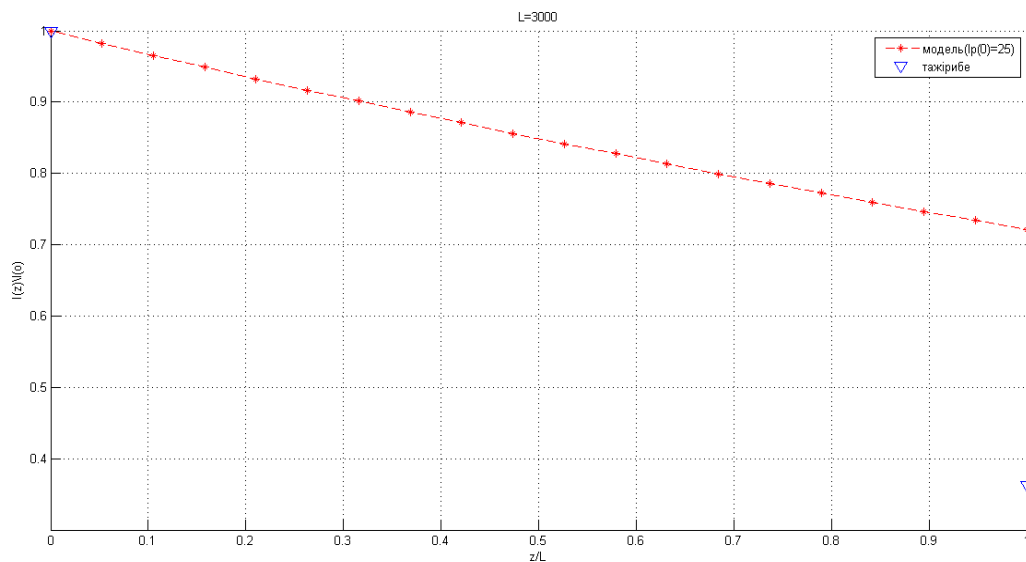


Сурет 4.12- Оптикалық талшық ұзындығы  $L=20000$  м кезіндегі МБЕШ эффектісі басталған нүктелері. Тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

Қоссәулені бірге таратқанда кіріс сәуленің энергиясы 25 дБ және 27 дБ шамаларында МБЕШ табалдырығы мәніне жетпегендігі тәжірибелік нәтижелер мен модель нәтижелерінің сәйкес келмеуінен болатындығын анықтауға болады (сурет 4.13-4.15).



Сурет 4.13- Оптикалық талшық ұзындығының  $L=1000$  м кезіндегі тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі



Сурет 4.14- Оптикалық талшық ұзындығының  $L=3000$  м кезіндегі тура бағыттағы сәуле қуатының талшық ұзындығына тәуелділігі

Matlab бағдарламалау ортасында жазылған бағдарлама листингі Қосымша В, С көрсетілген.



## Қорытынды

Әр-түрлі толқын ұзындығында болатын жарық сәулелерінің көмегімен бір модальды оптикалық талшық бойындағы МБЕШ эффектісін зерттеу жұмысына арналған тәжірибелік жұмыстарда әр толқын үшін жекелей және қосарланған күйде жіберілген жарық толқындарының кіріс, шығыс және кері шағылған қуаттарын тіркеу арқылы оптикалық талшықта орын алған бейсызықтық үдерістерді қарастыру, соның ішінде МБЕШ эффектісі зерттелді. Кіріс және шығыс қуаттарының, сонымен қатар, кіріс және кері шағылған сәулелердің қуаттарының арасындағы түзу сызықтық байланыстың бұзылу нүктесін бейсызықтық үдерістердің басталған нүктесі ретінде анықтап, сол нүктелерде орын алған үдерістердің МБЕШ-ына қатынасы Г.Агравал ұсынған модель арқылы дәлдігі өте жоғары деңгейде анықталды.

Зерттеу жұмыстары әрбір толқын үшін және олардың қосарланған күйінде, оптикалық талшықтың әртүрлі ұзындықтарында (150 м, 1000 м, 3 км, 8 км және 20 км) бейсызықтық үдерістерді тіркеуге арналған жұмыстар ұйымдастырылды. Зерттеу жұмыстары теориялық түрде тіркелмеуі тиіс бейсызық үдерістердің көптеген түрлері - Релэй шашырауы, еріксіз комбинациялық шашырауларын (Раман шашырауы) ескере отырып, ұйымдастырылды. Алайда зерттеу жұмыстарының соңында, нәтижелер алынған соң, бейсызық үдерістердің басқа да түрлері – фазалық өздік модуляция, фазалық кросс модуляция эффектірін тіркеуге қажетті құрылғылардың ұйымдастырылмауы себебінен, аталған үдерістердің бар-жоқтығын, олардың пайыздық үлесі қаншалықты екендігін тіркеу мүмкіндігі болмады. Алынған өлшеулердің көптігінің арқасында нәтижелерге математикалық өңдеулер жүргізудің нәтижесінде МБЕШ эффектісі анықталды.

Сонымен қатар, талшық бойындағы бейсызықтық үдерістердің басталу нүктелеріндегі мәндерінің талшықтың ұзындығына тәуелділігі өлшеу нәтижелерін тура өңдеу әдісі арқылы анықталды, ал математикалық модельдегі кері таңбалық дәрежелік заңдылықпен өзгеретін нәтижелерімен сәйкес келді. Жұмыстың негізгі мақсаты – бір модальды оптикалық талшықтағы әр-түрлі толқын ұзындықтары арқылы Бриллюэн-Мандельштам еріксіз шашырауына зерттеу жүргізіліп, зерттеу барысында төмендегідей мәселелер шешілді:

1. Аталған ғылыми жұмыстың тақырыбына сәйкес келетін қолжетімді барлық ғылыми жұмыстарға шолу жасалды;

2. Бір модальды оптикалық талшықтардағы бірнеше жиіліктегі толқындардың бір-бірімен әсерлесу ерекшеліктері зерттелді;

3. Толқын ұзындықтары 1310 нм және 1550 нм болатын сәулелердің жекелей түріндегі және бірлесіп толқынжолдан өткен және шағылысқан кездеріндегі импульстардың энергиясын өлшеу арқылы МБЕШ зерттейтін тәжірибелік зертхана ұйымдастырылды;

4. Тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерді математикалық модель құрастыру арқылы салыстыра отырып түсіндірілді.

Алғаш рет Мандельштам-Брюллиэн еріксіз шашырауын бір модальды

оптикалық талшықтарда әр-түрлі толқын ұзындықтарындағы оптикалық сәулелерді бір бағытта жіберу арқылы олардың бір-бірімен әсерлесуі және олардан туындаған акустикалық гипердыбыстардың бір-бірімен әсерлесуі эффектілері зерттеліп, кері шағылған стокстық сәулелердің кемуі байқалды. Алғаш рет аталған екі толқын ұзындықтарындағы әрқайсысын жекелей және бірлесіп жіберілген импульстардың модуляция жиіліктерінің өзгерісіне кері шағылған және өткен сәулелердің энергияларының тәуелділік заңдылықтары өлшенді. Алынған нәтижелердегі екі толқынның бірлесіп толқын жолдағы әсерлесу нәтижесінде кері шағылған және өткен сәулелердің МБЕШ табалдырығының төмендеуі байқалып, осы эффектіге математикалық модельдеу арқылы салыстырулар жүргізілді.

Тәжірибелік жұмыста алынған өлшеулердің мәндері математикалық модельден алынған нәтижелермен салыстыруда ең жоғарғы дәлдіктегі нәтижелерді көрсетті. Тәжірибелік өлшеулердегі әрбір толқынның жекелей қарастырғандағы бейсызықтық үдеріс басталған нүктелеріндегі мәндері Г.Агравал ұсынған математикалық модельмен тексергенде дұрыс нәтижелер берді. Жалпы жұмыстың нәтижесінде төмендегідей тұжырымдар ұсынылады:

1. Әр-түрлі толқын ұзындықтары сәуле көздерінен байқалатын МБЕШ табалдырығының мәндері осы екі толқынды бір арна арқылы таратқан кездегі МБЕШ табалдырығының мәнінен төмен болады;

2. Екі толқынды бір арнамен тарату кезінде сигналдардың тура өткен және кері шағылған сәулелердің энергиялары модуляция жиілігін жоғарылатқанда тиімді шектік мәндерді көрсетеді;

3. Тәжірибелік нәтижелерді негізге ала отырып, ұзындығы үлкен толқынжолдардағы бейсызық эффектілерді анықтауда МБЕШ эффектісінің үлесі жоғары болатындығы анықталды;

4. Қоссәулені тарату арқылы МБЕШ табалдырығының артуы қоссәуленің жекелей таратқан кездегі МБЕШ табалдырық мәндеріне жетпеуі салдарынан болады.

Сонымен қатар, қоссәуле таратылған жағдайдағы МБЕШ табалдырығының шектік мәніне 27 дБ энергиясында жетпегендігін тәжірибеден алынған зерттеулер нәтижесі мен МБЕШ эффектісін анықтайтын модель нәтижелерімен салыстырғандағы сәйкессіздіктер арқылы дәлелдеуге болады.

## Пайдаланылған әдебиттер тізімі

1. Агравал Г., Нелинейная волоконная оптика.-М: Мир, 1966. -323с.
2. Булгакова С. А., Дмитриев А. Л. Нелинейно-оптические устройства обработки информации: учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, - 2009. – 56с.
3. Голышев В.Ю., Жуков Е.А., Самарцев И.Э., Слепов Д.Г. Влияние фазовой самомодуляции на вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна в волоконно-оптических линиях связи // Журнал технической физики. -2004. – Т. 74, вып. 7. -С.66-69.
4. Беспрозванных А.В. Проявление нелинейных эффектов в оптических волокнах// Электротехника и электромеханика. -2005. -№ 1. -С.8-13.
5. Фотиади А.А., Киян Р.В. Уменьшение глубины модуляции шумового стоксового поля при ВРМБ в одномодовом оптическом волокне с высокими рэлеевскими потерями // Письма в ЖТФ. -2001. - Т. 27, вып. 4. –С. 72-81
6. Беспалов В.И., Бетин А.А., Пасманик Г.А., Шилов А.А. Наблюдение временных осцилляции поля в излучении вынужденного рассеяния Мандельштама - Вриллюэна // Письма в ЖЭТФ. Т 31, вып. 11. -С. 668-672
7. Фотиади А.А., Кузин Е.А. Шумавые модуляции интенсивности рассеянного излучения при ВРМБ в одномодовом оптическом волокне в режиме сильного истощения накачки //ЖТФ. -1995. -Т. 65, вып. 7. С.195-199
8. Богачев В. А., Кочемасов Г. Г., Стариков Ф. А. Обращение волнового фронта при ВРМБ сфокусированного лазерного спекл-пучка // Квант электрон, -2008. –Т. 38, № 9, -С.849–854
9. Гордеев В.Ф., Ефимков И.Г., Зубарев С.И., Михайлов А.А. Фазировка стоксовой волны приударном возбуждении ВРМБ. Квант. электрон., -2011. - Т. 41, № 1, -С. 997–1002.
10. Ерохин А.И., Олейников В.В., Путилин А.А. Структура спектра вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. -1995.–Т.61, №11. -С.873-878.
11. Ерохин А.И., Михайлов С.И. Управление стоксовым сдвигом частоты сдвига в петлевом ВРМБ- лазере. Квантоваяэлектроника -1997.– Т.24, №7. -С. 659-661.
12. Оспанова Н.А., Кемельбеков Б.Ж., Бахтиярова Е.А., Жетписбаева А.Т., Кулакаева А.Е., Косяков И.О. Коэффициент ослабления оптических, подвергшихся облучению тепловыми нейтронами волокон при сдавливании. Известия высших учебных заведений // Физика. - Издание Томского университета, -2015. - Т.58, №3. - С.3-6.
13. Оспанова Н.А., Жетписбаева А.Т., Кулакаева А.Е.. Исследование динамики коэффициента пропускания оптического волокна от времени раздавливающей нагрузки при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  // Вестник КазНУ. - 2015. – Т.52, №1. - С.110-113.
14. Бахтиярова Е.А., Жетписбаева А.Т., Оспанова Н.А. Нелинейные

эффекты в оптических сетях // Вестник КазАТК. - Алматы, -2015. –Т.92, №1. - С.55 – 59.

15. Наний О.Е., Павлова Е.Г. Взаимосвязь порога ВРМБ и акустических характеристик оптического волокна. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2010. -Т. 4. №8, - С.55-56.

16. Талипов А. А. Оптико-электронные полигармонические системы зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама- бриллюэна для измерения температуры и растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне. Диссертация. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

17. Кузнецов В.А., Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы// Фотон-Экспресс, - 2009, № 2. –С.21- 28.

18. Пат. 2229693 РФ. Рефлектометр для измерения распределения напряжения и температуры в волоконных световодах / Наний О.Е.; опубл. 27.05.2004.

19. Рекомендация МСЭ-Т G.650 Определение и методы проверки параметров одномодовых волоконно-оптических кабелей.

20. Рекомендация МСЭ-Т G.653 Характеристики одномодового волоконно- оптического кабеля со сдвигом дисперсии.

21. Рекомендация МСЭ-Т G.654 Характеристики одномодового волоконно- оптического кабеля с затуханием, минимизированным на волне 1550 мкм.

22. Кемельбеков Б.Ж., Мышкин В.Ф., Хан В.А. Приемники и приемные модули, Современные проблемы волоконно-оптических линии связи. – Томск: НТЛ, -2001. – Т. 3. – 341 с.

23. Воронин В.Г., Наний О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики/ Учебное пособие. М. «Университетская книга». -2011, - 128 с.

24. Богачков И. В., Овчинников С. В., Горлов Н. И. Повышение точности оценки распределённых нерегулярностей в оптических волокнах. // Вестник СибГУТИ. -2012. № 4, - С.3-13.

25. Лихачев М.Е., Алексеев В.В., Бубнов М.М., Яшков М.В., Вечканов Н.Н., Гурьянов, А.Н. Влияние длины волны накачки и размера сердцевины световодов с акустической антиволноводной структурой. Квантовая Электроника, -2014, -Т.44, № 11, - С.1043-1047.

26. Zhu Xue-Hua, Lu Zhi-Wei, Wang Yu-Lei, A new method for measuring the threshold of stimulated scattering // Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd, -2012. - P. 1055-1061.

27. Marconi J.D., Chavez J.M., Boggio F.A., Callegari A., Double-pumped parametric amplifier with strained fibre to suppress SBS, Electronics letters, November. -2004. -Vol. 40, №.24. -P. 1513-1516.

28. Mitra, P. P., Stark, J. B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications. Nature, -2001. -Vol.411, № 6841. -P. 1027-1030.

29. Кемельбеков Б. Ж., Жунусов К.Х., Жетписбаева А. Т. Исследования потери энергий при соединении волоконно-оптических // «Роль и место молодых ученых в реализации экономической политики Казахстана» Труды Международных Сатпаевских чтении. - Алматы: ҚазҰТУ, -2015.

30. Жетписбаева А.Т., Жунусов К.Х., Бекмагамбетова Ж.М., Оспанова Н.А. Нелинейные эффекты на разных частотах модуляций сигналов при фиксированной длине оптического волокна. // Международная научно-техническая конференция. Современные информационно-телекоммуникационные технологии. Материалы научно-технической конференции. Том II. Актуальные вопросы построения современных телекоммуникационных систем и сетей. -2015.

31. Жетписбаева А.Т., Далабай С., Сихимбаева А.Д., Исследование мощности сигнала обратного рассеяния в одномодовом волокне // Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции «Новая наука: современное состояние и пути развития», -Оренбург, Россия, - 2016 г. -С.65-68.

32. Кемельбеков Б.Ж., Бахтиярова Е.А., Жетписбаев К.У., Жетписбаева А.Т. Талшықтық-оптикалық байланыс желісіне қызмет көрсету және жөндеу қағидасы. - Астана. -2015. -208б.

33. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Талипов А.А., Куприянов В.Г. Определение характеристик спектра усиления Манделъштама–Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. -2012. -Т.15, №3. -С. 95-100.

34. Ibraev A.T., Zhetpisbayeva A.T. , Research of dependence of output and reflected signals power at wavelengths 1,31  $\mu\text{m}$  and 1,55  $\mu\text{m}$ // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные условия взаимодействия науки и техники» , -Казань; Россия, - 2017. –ч. 1. - С.8-10

35. Жетписбаева А.Т., Сенбай Д. Моделирование эффекта вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне при совместных волнах 1310нм и 1550нм// Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» -2016. 363 с.

36. Далабай С., Жунусов К.Х., Жетписбаева А.Т., Оспанова Н.А.. 1310 нм мен 1550 нм толқындарын бір бағытта жіберудегі Манделъштам-Бриллюээн еріксізк шашырау үрдісін зерттеуді моделдеу// Вестник КазАТК. – 2016. –Т.2, № 97. - С.89 - 93

## **А Қосымша**

**Берілген диссертациялық жұмыста келесі анықтамалар қолданылады:**

**Бір модалы талшық** – жарықты тарату кезінде тек бір моданы ғана қолдайтын оптикалық талшық, бұл жағдай шекаралық толқын ұзындығынан

асқан жағдайда болады.

**Бөлгіш** – бірнеше жарық тасымалдағыштарынан келіп түсетін жарық қуатын шығысында бірнеше жарық тасымалдағыштарына бөлетін оптика-талшықты элемент (енгізу-шығару құрылғысы).

**Жұтылу** – оптикалық қуаттың жылуға айналуының нәтижесінде және металдармен, гидроксильді иондармен ластанудың және радиациялық сәулеленуге сезімталдықтың себептерінен оптикалық талшықтағы қуаттың жоғалуы.

**Жарықтың параметрлік генераторы** – бейсызықты оптикалық ортадағы оптикалық сәуленің оған әсері арқылы бейсызықты ортаны өзгерту арқылы және пайда болған сәуленің жиілігінің үздіксіз өзгеруін жүзеге асыруға негізделген оптикалық сәулені тудыратын құрылғы.

**Жарықтың комбинациялық шашырауы**- дегеніміз түскен сәуленің заттың бөлшектерімен әсерлесу нәтижесінде шашыраған сәуленің жиіліктері едәуір өзгеру құбылысын айтады.

**Кері бәсеңдеу** – талшықтың кірісіне бәсеңдеген жарықтың бір бөлігін қайтару немесе жарықтың бастапқы бағытына қарама-қарсы бағытта бәсеңдеуі.

**Көп модальды оптикалық талшық** ақпарат таратуды қамтамасыз ететін оптикалық талшық, ол екі немесе одан көп модальдардың электромагниттік импульстері көмегімен жүзеге асырылады.

**Қайталағыш** – сандық сигналдың биттерін регенерациялау үшін арналған құрылғы. Қайталағыш - оптикалық сигналды электронды сигналға айналдырады, сонымен қатар биттердің синхрондалуын қалпына келтіреді, ақпараттық сигналды модуляциялайды және жаңа оптикалық сигналды шығарады.

**Мәжбүрлі шашырау дегеніміз** – заттың құрамындағы микробөлшектердің (электрондардың, атомдардың, молекулалардың) қозғалысының (тербелісінің) өзгеруінен түскен интенсивтілігі жоғары жарықтың әсерінен жарықтың шашырауын айтамыз.

**Оптикалық бөлгіш** – бөліктеп шеғылдыратын жарық сәулесін екі не одан да көп сәулелерге бөлетін, айна тәріздес оптикалық құрылғы. Талшықты инжекторларға қатысты бағытталған оптикада қолданылуы мүмкін.

**Оптикалық қабықша** – төмен сыну көрсеткішіне ие, талшықтың өзекшеесін қоршап тұратын сыртқы қабықша.

**Оптикалық рефлектометр** (Optical time domain reflectometer OTDR) – оптикалық талшықтың сипаттамаларын толық анықтайтын құрал. Жарық импульстері бәсеңдейді және кері бағытта шағылады. Бұл құрал қабылданатын сигналдың уақытқа тәуелді өлшемдерін, талшықтағы қателіктер мен қосымша шығынның басқа да себептерін, сонымен қатар, талшықтың кез-келген бөлігіндегі шығынды анықтауға мүмкіндік береді.

**Поляризатор** – жарық толқындарын электр өрісінің белгіленген бағытында өткізетін құрылғы.

**Пассивті құрылғы** – өзінің қызметін атқаруда қорек көзін қажет етпейтін жүйенің бір бөлігі.

**Сыну көрсеткіші (Refractive index)** – оптикалық тығыз ортада мысалы, шыныда, вакуумге қарағанда жарық жылдамдығының қаншалықты кем екенін білдіретін коэффициент. Сыну көрсеткіші екіге бөлінеді: фазалық және топтық болып. Сыну көрсеткіші вакуумнен басқа оптикалық ортада толқын ұзындығына байланысты.

**Толық ішкі шағылу (Total internal reflection)** – жарық сәулесінің толық шағылуымен сипатталатын, екі ортаның шекарасында болатын физикалық құбылыс. Жарық сәулесінің сыну көрсеткіші жоғары ортадан, ал сыну көрсеткіші төмен ортамен келіп, арадағы шекараға критикалық бұрыштан жоғары бұрышпен түскен кезде пайда болады.

**Уақыттық домені бар оптикалық рефлектометр (Optical time domain reflectometer OTDR)** – шағылған жарықты детектрлеуге негізделген (оптикалық «радар») оптикалық талшықтарды тестілеу әдісіне негізделген құрал. Бұл құрал талшықтың өшіру қабілетін өлшеу үшін, муфталық және коннекторлық қосылулардың сапасын бағалау және қосымша шығындардың орнын анықтау үшін қажет.

**Френель шағылуы** – сыну коэффициенті әртүрлі екі материалдың шекарасында болатын шағылу. Френель шағылуы түсу бұрышына тәуелді болмайды.

**Шағылу** – жарық сәулесінің бағытын екі түрлі ортаның шекарасында өзгеріліп, өзінің келген ортасына қайтуы.

**Шағылу кезіндегі оптикалық шығындар** – құрылғыны желіге немесе жүйеге жалғағанда, осы құрылғының кірісінде өлшенетін оптикалық қуатқа құрылғыдан немесе оның бір бөлігінен шағылған оптикалық қуаттың (дБ) қатынасы.

## **Б Қосымша**

**Математикалық модельдің MathLab бағдарламалық платформасындағы коды**

```
alpha = 0.35;  
L = 0:100;
```

```

Lf = 4.343/alpha*(1 - 1./(exp(0.23*alpha.*L)));
Lf1 = 4.343/alpha1*(1 - 1./(exp(0.23*alpha.*L)));
d_Vls = [0.3, 30, 50, 100, 200];
Clrs = ['r','b','g','y','k'];
Df = 9.2;
Len = length(d_Vls);
for i = 1:Len
    d_VlsI = d_Vls(i);
    Psbs = 14.8 - 10*log10(Lf)+10*log10(1 + d_VlsI/20) +
20*log10((Df)/9.2); hold on;
plot(L,Psbs,Clrs(i),'LineWidth',2);grid on;
xlabel('L');
ylabel('Psbs');
end;

alpha1 = 0.22;
L = 0:100;
Lf1 = 4.343/alpha1*(1 - 1./(exp(0.23*alpha.*L)));
d_Vls = [0.3, 30, 50, 100, 200];
Clrs = ['r','b','g','y','k'];
Df1 = 10.4;
Len = length(d_Vls);
for i = 1:Len
    d_VlsI = d_Vls(i);
    Psbs = 14.8 - 10*log10(Lf1)+10*log10(1 + d_VlsI/20) +
20*log10((Df1)/9.2);
    hold on;
plot(L,Psbs,Clrs(i),'LineWidth',2);grid on;
xlabel('L');
ylabel('Psbs');
end;

```



## В Қосымша

### Мәліметтерді тура әдіспен тексеру

```
clear all;
clc;

L = [150 1000 3000 8000 20000];
P1310 = [12 10.5 9.3 8 7.3];

figure; %1
plot(L,P1310, '*');

LnX = log(L);
LnY = log(P1310);
%LnY = A + B*LnX

Xor = mean(LnX);
Yor = mean(LnY);

B = (sum((LnX - Xor).*LnY)) / (sum((LnX - Xor).^2));
A = Yor - B*Xor;

X(1) = LnX(1);
X(2) = LnX(end);
Y(1) = A + B*X(1);
Y(2) = A + B*X(2);

figure; %2
plot(LnX, LnY, '*', X,Y, 'r');

figure; %3
a = exp(A);
b = B;
X = linspace(L(1), L(end), 100);
Y = a*X.^b;
plot(L, P1310, '*', X, Y, 'r');

%=====
% Y = a*exp(bx);
%=====
===== X = [];
Y = [];
```

```

Xor = mean(L);
Yor = mean(LnY);

B = (sum((L - Xor).*LnY)) / (sum((L - Xor).^2));
A = Yor - B*Xor;

X(1) = L(1);
X(2) = L(end);
Y(1) = A + B*X(1);
Y(2) = A + B*X(2);

figure; %4
plot(L, LnY, '*', X, Y, 'r');

figure; %5
a = exp(A);
b = B;
X = linspace(L(1), L(end), 100);
Y = a*exp(X*b);
plot(L, P1310, '*', X, Y, 'r');

```

## Г Қосымша

**Тәжірибеде алынған нәтижелердегі МБЕШ  
эффектісін математикалық модель арқылы тексеру**

```
clear
all;
clc;
%Коэффициент ослабления (взято из паспорта волокна)
Alpha_db = 0.35;% для волны 1550 нм - альфа - 0.22, для 1310 нм -
0.35 a = 10^(Alpha_db/10)/1000;

gB = 0.2; %найдено из эксперимента

%для перевода из dbm в
Вт1 P0 = 0.001;

fName =
'C:\dates1310.txt';
V = load(fName);
L = V(:,1)/10;
Ip1 = V(:,2);
Ip2 = V(:,3);
Is1 = V(:,4);

Ipp1 =
zeros(1,length(L)); Ipp2
= zeros(1,length(L));

for J=1:length(L)
Ipp1(J) = (10.^(Ip1(J)/10))*P0;
Ipp2(J) = (10.^(Ip2(J)/10))*P0;
Is1(J) = (10.^(Is1(J)/10))*P0;

z = linspace(0, L(J),
20); z=z';

g0 =
gB*Ipp1(J); b0
= Is1(J)/Ipp1(J);

G = exp((1-b0)*(g0/a)*(1-exp(-
a*z))); A1 = exp(-a*z);
A2 = (1-
b0)*G*Ipp1(J); A =
```

```

A2.*A1;
B = (G -
b0); Ip =
A./B;

figure;
plot(z/L(J),Ip/Ipp1(J),'*--');
holdon;

Z(1) = 0;
Z(2) =
L(J);
IpExp(1) =
Ipp1(J);
IpExp(2) =
Ipp2(J);
plot(Z/L(J), IpExp/Ipp1(J),'r*');

S = strcat('L=',num2str(L(J)*10),', Ip(0)=', num2str(Ip1(J)));

title(S);

holdoff;

```