



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ



ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

Секция *“ИНФОРМАЦИОННИ ПРОЦЕСИ И СИСТЕМИ ЗА ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ”*

ДИСЕРТАЦИЯ

на тема:

МОДЕЛИРАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ТЕМПЕРАТУРАТА ВЪРХУ ПАРАМЕТРИТЕ НА УРЕДИ ЗА НОЩНО ВИЖДАНЕ

за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”
научна специалност: 02.21.10 “Приложение на принципите и методите на
кибернетиката в различни области на науката (техническа)”
професионално направление: 5.2. “Електротехника, електроника и автоматика”

Докторант:

инж. Евгени Димитров Бантутов

Научен консултант:

доц. д-р Даниела Борисова

София
2014

Съдържание

Увод	7
ГЛАВА 1. Уреди за нощно виждане с електронно-оптични преобразуватели	9
1.1. Видове електронно-оптични преобразуватели.....	11
1.1.1. ЕОП с електростатично фокусиране	16
1.1.2. ЕОП с оптично увеличение	17
1.1.3. ЕОП с магнитно фокусиране.....	19
1.1.4. Каскадни ЕОП.....	20
1.2. Поколения ЕОП	26
1.3. Основни параметри на ЕОП	28
1.3.1. Чувствителност	28
1.3.2. Светлинно усилване	28
1.3.3. Разделителна способност на ЕОП.....	28
1.3.4. Квантова ефективност.....	29
1.3.5. Ореол	29
1.3.6. Време на живот на ЕОП и температурен диапазон.....	29
1.3.7. Контраст	30
1.3.8. Модулационно-трансферна функция	31
1.3.9. Светлинен шум	31
1.3.10. Отношение сигнал/шум	32
1.3.11. Ток на тъмно. Еквивалентна фоновая осветеност.....	33
1.4. Методи за определяне на характеристиките на УНВ	33
1.4.1. Измерване на разделителна способност на УНВ	33
1.4.2. Осветеност.....	35
1.4.4. Зрително поле и диоптрийна настройка.....	35
1.4.3. Попилно разстояние	36
1.4.5. Методи за определяне на разстоянието на действие на УНВ	36
1.5. Цел на дисертационния труд	41

ГЛАВА 2. Обобщен метод за определяне на разстоянието на действие на УНВ с отчитане на температурата.....	42
2.1. Влияние на температурата върху тока на тъмно	43
2.1.1. Методи за измерване на еквивалентната фонова осветеност	44
2.1.2. Причини за явлението “ток на тъмно” и на еквивалентната фонова осветеност.....	46
2.1.3. Влияние на термичните промени на ЕФО върху параметрите на УНВ.....	54
2.2. Енергетичен разчет – същност, етапи, основно уравнение	55
2.3. Определяне на зависимост между температурата и параметрите на УНВ.....	57
2.3.1. Измерване и същност на параметъра сигнал/шум	61
2.3.2. Дефиниране на температурно зависим коефициент	63
2.4. Определяне разстоянието на действие на УНВ с отчитане на температурата	67
2.5. Методология за определяне на различни комбинации на външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ	71
2.5.1. Определяне на гранични параметри на външните условия на наблюдение за УНВ със зададено разстояние на действие	72
2.6. Алгоритъм за предварителна оценка на проектирането на УНВ при зададени външни условия	75
ГЛАВА 3. Резултати от проведените експериментални изследвания.....	79
3.1. Описание на проведените експериментални изследвания за влияние на температурата върху параметрите на УНВ.....	79
3.1.1. Използвана апаратура	81
3.1.2. Описание на опитната постановка.....	82
3.1.3. Описание на разработен високоволтов импулсен преобразовател на напрежение за електронно-оптичен преобразувател	85
3.1.4. Измерване на осветеност. Кръг на Ландолт.....	88
3.1.5. Описание на използваната термична камера.....	90
3.1.6. Метод за установяване на температурата	92
3.2. Резултати от експериментално измерване на разстоянието на действие на УНВ ПРИЛЕП-М	93
3.2.1. Резултати от измервания, проведени с три мири	93
3.2.2. Анализ на резултатите от извършените експерименти с три мири	99
3.2.3. Резултати от измервания, проведени с пет мири	101
3.2.4. Анализ на резултатите от извършените експерименти с пет мири	102
3.3. Определяне на функцията на изменение на температурния коефициент K_T чрез получените експерименталните резултати	104

3.3.1. Сравнение на резултатите от експериментално определените стойности за температурния коефициент K_T с теоретично определените.....	105
3.4. Резултати от полеви изпитания – сравнение между теоретични и експериментални резултати.....	106
3.5. Тестване на предложената методология за определяне на различни комбинации на външните условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ.....	107
3.6. Описание на прототип на уеб-базирано приложение за оценка на параметрите на проектираните УНВ в зависимост от температурата.....	112
Заклучение	115
Приноси.....	117
Списък на публикациите по дисертационния труд	118
Декларация за оригиналност на резултатите	119
Библиография	120

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ И ОЗНАЧЕНИЯ

УНВ	–	уреди за нощно виждане
ОНВ	–	очила за нощно виждане
ЕОП	–	електронно-оптичен преобразувател
МКП	–	микроканална пластина
ВОП	–	влакнесто-оптична пластина
$A_{вх}$	–	площ на входната зеница на обектива
$A_{вхет}$	–	еталонен диаметър на светлинното петно фокусирано върху фотокатода (MIL-STD-105)
$A_{об}$	–	площ на наблюдаваният обект
$A_{отде}$	–	отделителна работа, необходима за отделянето на електрона от повърхността на метала
α_n	–	ъгъл между нормалата към обекта и направлението към луната
$\alpha_{фл}$	–	ъгъл между нормалата към повърхността на фона и направлението към луната
β_a	–	показател на затихване в атмосферата
$B_{екв}$	–	еквивалентна яркост на тъмно
$B_{магн}$	–	магнитна индукция
B_0	–	яркост на тъмно
$C_{пл}$	–	плътност на зарядите в фотокатода
Γ	–	видимо увеличение
G	–	усилване на ЕОП
γ	–	разделителната способност на УНВ
j	–	плътност на тока на термо електронната емисия
$D_{вх}$	–	диаметър на входната зеница на обектива
d_o	–	диаметър на светлото петно
d	–	ефективен диаметър на входящият отвор на уредът за нощно виждане
$E_{кин}$	–	кинетичната енергия на порцията светлина
E	–	естествена нощна осветеност
$E_{ет}$	–	еталонно ниво на осветеност на фотокатода (MIL-STD-105)
Φ	–	светлинен поток
$\Phi_{вх}$	–	светлинен поток, постъпващ на входа на уреда
$\Phi_{вх.мин}$	–	необходим минимален входящ поток
$\Phi_{екран}$	–	количество фотони, попаднали върху екрана
$\Phi_{об.еф}$	–	ефективен поток от обекта
$\Phi_{праг}$	–	праговата чувствителност на уреда
$\Phi_{пр.фк}$	–	прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП
$\Phi_{ф.еф}$	–	ефективен поток от фона
$\Phi_o(\lambda)$	–	спектрален поток излъчван от обекта
$\Phi_e(\lambda)$	–	спектрален поток излъчван от еталонен източник
$f_{об}$	–	фокусно разстояние на обектива
$f_{ок}$	–	фокусно разстояние на окуляра
φ	–	моментна интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП
f'	–	задно фокусно разстояние на обектива
Δf	–	честота на измерване
Δf_e	–	еталонна честота за измерване отношението сигнал/шум на ЕОП (MIL-STD-105)
F	–	шумов фактор на ЕОП
F_e	–	еквивалентен шумов фактор на ЕОП
h	–	константа на Планк
I_T	–	сила на излъчване от точков обект
I	–	сила на светлинното излъчване от обекта
k	–	диафрагмено число
K	–	контраст между обекта и фона
$K_{общ}$	–	коэффициент на усилване на целият фотоелектронен умножител
$K_{1дин}$	–	коэффициент на усилване на първият динод
K_1	–	коэффициент на усилване на първия ЕОП
K_2	–	коэффициент на усилване на втория ЕОП
K_e	–	геометричен размер на светлинния образ върху екрана на ЕОП
K_e	–	коэффициент на използване на приемника по отношение на еталонен източник с отчитане на оптичното затихване
K_p	–	коэффициент на усилване на последният ЕОП

K_p	–	коэффициент на използване на приемника с отчитане на затихването в атмосферата и оптичните детайли
K_{yc}	–	коэффициент на усилване
K_ϕ	–	геометричен размер на светлинния образ, проектиран върху фотокатода
K_ϕ	–	коэффициент на използване на приемника по отношение на фона
$K(\Delta f)$	–	коэффициент отчитащ изменението на честотата на модулацията, при еталонна честота
$K(\Phi_\phi)$	–	коэффициент показващ понижаването на чувствителността на приемника в резултат на шумови смущения получени от фона
$L_{об}$	–	яркост на обекта
L_ϕ	–	яркост на фона
L_H	–	яркост на нощно небе
l	–	разстояние до обекта
l_ϕ	–	разстояние до фона
λ_1	–	долна граница на дължината на светлинната вълна, определяща спектралната чувствителност на приемника
λ_2	–	горна граница на дължината на светлинната вълна, определяща спектралната чувствителност на приемника
m	–	маса на електрона
m_1, n_1	–	дълбочина на модулация на светлинният поток, излъчен от фона и наблюдавания обект
μ	–	необходимо минимално отношение сигнал шум
N	–	шум
N_o	–	средноквадратично отклонение на шума на постояннотоковият сигнал
N_{bkd}	–	средноквадратично отклонение на шума, съответстващ на тока на тъмно
ν	–	честотата на електромагнитната вълна
η_0	–	коэффициент преобразуване на ЕОП
π	–	числото “пи” ≈ 3.14
q	–	големината на елементарен електрически заряд, измерен в кулон ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
Q	–	заряд на електрона ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
R	–	разстояние на действие
ρ_ϕ	–	коэффициент на отражение от повърхността на фона
$\rho_{об}$	–	коэффициент на отражение от повърхността на наблюдавания обект
σ	–	радиално отклонението на електрона
S_{bkd}	–	постоянно токов сигнал на изхода на спектроанализатора, съответстващ на тока на тъмно
S_c	–	сигнал
S_o	–	постоянно токов сигнал на изхода на спектроанализатора
S_Σ	–	интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП
$S(\lambda)$	–	относителна спектрална чувствителност на приемника
S_{2856}	–	интегрална чувствителност при 2856 K°
S/N_{et}	–	еквивалентно температурно отношение сигнал шум
S_i	–	интегрална чувствителност на ЕОП
$T_{ЕОП}$	–	времето на живот на ЕОП
T_e	–	еталонна температура, при която се измерват параметрите на ЕОП в лабораторни условия
T	–	температура на околната среда
$T_o(\lambda)$	–	спектрален коэффициент на пропускане на оптичната система
t	–	време на движение на електрона
τ_a	–	пропускане на атмосферата
$\tau_a(\lambda)$	–	спектрален коэффициент на пропускане на атмосферата
τ_o	–	интегрален коэффициент на пропускане на оптичната система
$V_{лин}$	–	линейно увеличение характерно за ЕОП
V_e	–	скоростта на отделеният електрон
V_L	–	скорост на електрона
V_r	–	радиална скорост на електрона
U_a	–	потенциал между екрана и фотокатода
U_{el}	–	отделителна работа, извършена от електрона
ω	–	зрително поле

УВОД

В съвременните условия на непрекъснат технологичен прогрес се наблюдава разширяване на приложните области на много високотехнологични уреди и устройства. Типичен пример в това отношение са уредите за нощно виждане (УНВ). Използването на съвременни технологични решения позволи намаляване на цените на УНВ и ги направи достъпни за широк кръг военни и граждански приложения. Военните приложения са традиционна приложна област за УНВ – управление на бойни машини от различни типове (самолети, хеликоптери, танкове, морски съдове, транспортни машини), водене на бойни действия в нощни условия (стрелба, патрулиране, разузнаване) и др., но напоследък УНВ се използват масово и за граждански цели – при спасителни операции, при бедствия и аварии, навигация и управление на транспортни средства, за научни изследвания, за охрана, за туризъм и развлечения и т.н.

В тази връзка, провеждането на научни изследвания, които позволяват да се направи оценка на различните показатели на УНВ, по отношение на тяхната ефективност в различни условия на наблюдение, е едно актуално научноизследователско направление. При проектирането и използването на УНВ е от значение своевременното оценяване на ефективността им, като се отчитат всички вътрешни и външни фактори, влияещи на параметрите на УНВ. Един от важните външни фактори, оказващ влияние върху работоспособността на УНВ, е температурата на околната среда. Това влияние е съществено от гледна точка на определяне на възможностите за ефективно използване на УНВ при различни външни условия.

Обект на изследване в дисертационния труд са уредите за нощно виждане, а *предмет на изследването* е влиянието на температурата на околната среда върху параметрите на уредите за нощно виждане, базирани на използването на електронно-оптични преобразуватели (ЕОП) за усилване на светлината.

Дисертационният труд е структуриран в 3 глави и заключение.

В **Глава 1** е направен анализ на УНВ с ЕОП, анализирани са методите за определяне на характеристиките на УНВ и получените научни и научно-приложни резултати в тази област. Определени са перспективните изследователски направления в областта.

В **Глава 2** е описан подход за определяне на функционална зависимост на разстоянието на действие на уредите за нощно виждане с ЕОП от температурата на

околната среда. За целта е въведен температурно зависим коефициент, чрез който може да бъде определено разстоянието на действие като функция на температурата. На базата на енергетичен разчет и с използване на въведения температурно зависим коефициент е предложен обобщен метод за определяне на разстоянието на действие на УНВ при различни температури на околната среда. Разработена е методология за определяне на различни комбинации на външните условия на наблюдение, съответстващи на зададени технически спецификации на УНВ. Създаден е алгоритъм за проектиране на УНВ, позволяващ предварителна оценка на параметрите на проектираното устройство с отчитане на температурата на околната среда.

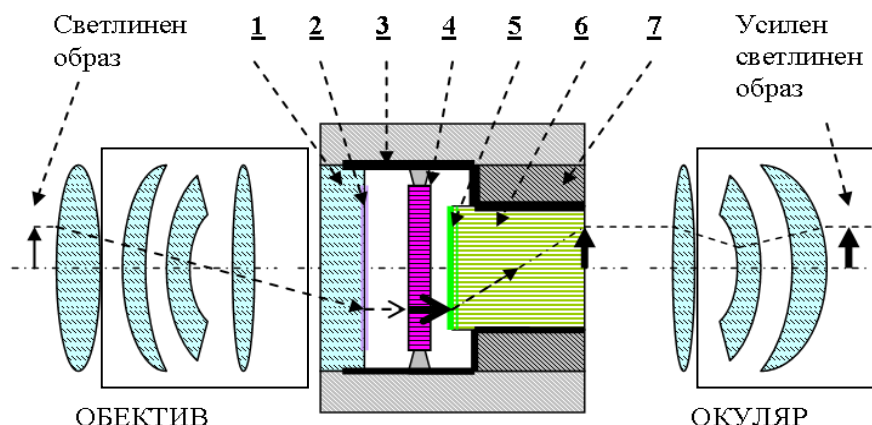
В **Глава 3** са описани проведените експериментални изследвания на влиянието на температурата върху параметрите на уреди за нощно виждане. Представени са резултати от експерименталното измерване на разстояние на действие на УНВ при различни температури на околната среда и при различни нива на осветеност. Резултатите от експерименталните изследвания са използвани за определяне на аналитична зависимост на въведения температурен коефициент от температурата. Предложената методология за определяне диапазоните на изменение на външните условия, при които уредът има едно и също разстояние на действие, е приложена за два типа УНВ (очила и прицел) и са описани получените резултати. Описан е прототип на уеб-базирано приложение за предварителна оценка на параметрите на проектираните УНВ в зависимост от външните условия на наблюдение. В заключението са посочени насоки за бъдещи изследвания.

ГЛАВА 1.

УРЕДИ ЗА НОЩНО ВИЖДАНЕ С ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В съвременните условия на технологично развитие се наблюдава намаляване на цените и разширяване на приложните области на много високотехнологични уреди и устройства. Типичен пример в това отношение са уредите за нощно виждане (УНВ). Понастоящем УНВ са достъпни не само за военни, но и за много граждански приложения. Военните приложения са традиционна област за УНВ и включват управление на бойни машини от различни типове (самолети, хеликоптери, танкове, морски съдове, транспортни машини), водене на бойни действия в нощни условия (стрелба, патрулиране, разузнаване) и др. Заедно с тези приложения, напоследък УНВ се използват масово и за граждански цели – за спасителни операции при бедствия и аварии, за навигация и управление на транспортни средства, за научни изследвания, за охрана, за туризъм и развлечения и т.н. В тази връзка, провеждането на научни изследвания, които позволяват да се направи оценка на различните показатели на УНВ, по отношение на тяхната ефективност в различни условия на наблюдение, е едно актуално научноизследователско направление. Един от важните външни фактори, оказващ влияние върху работоспособността на УНВ, е температурата на околната среда. Това влияние е съществено от гледна точка на определяне на възможностите за ефективно използване на УНВ при променливи външни условия. От практическа гледна точка, най-съществения параметър на УНВ е разстоянието на действие в неговите четири разновидности – разстояние на откриване, разстояние на ориентация, разстояние на разпознаване и разстояние на идентификация (Sabatini и др., 2013; Schwering и др., 2013; Borissova & Mustakarov, 2006; Lombardo Jr., 1998). Масово използваните УНВ, които са обект на изследване в настоящия труд, се основават на усилване на отразената светлина, от нощното небе, от отражението на различни светлинни източници на земната или водна повърхност и т.н. (A Basic Guide to Night Vision, 2001; Pinkus & Task, 1997; Bijl & Valetton, 1998), които са базирани на усилване на светлинния образ чрез електронно-оптичен преобразувател (ЕОП). Основните конструктивни елементи на този тип УНВ са: обектив, ЕОП, окуляр, електро-захранващ блок и механична конструкция. Отразената от наблюдавания обект светлина се фокусира от обектива върху фотокатода на ЕОП. Фотокатодът преобразува светлинния образ от видимата и близката ИЧ област в електронен образ, микроканалната пластина (МКП) го усилва, а фосфорният екран го превръща отново в светлинен образ от видимата част на спектъра (Фиг. 1.1) (Image Intensifier Tutorial).

Чрез подходящ окуляр се наблюдава получения върху екрана на ЕОП изходен образ, който е в жълто-зелен или синьо-зелен оттенък. Зеленият цвят се използва поради факта, че човешкото око притежава възможността да различава повече нюанси на зеления цвят, отколкото при другите цветове.



Фиг.1.1 Принцип на действие на УНВ с усиление на светлината

Елементи на ЕОП: 1 – плоско паралелна оптична пластина, 2 – фотокатод, 3 – метало-керамичен корпус, 4 – микроканална пластина, 5 – екран, 6 – влакнесто-оптичен обръщателен елемент, 7 – високоволтов електро-захранващ преобразувател.

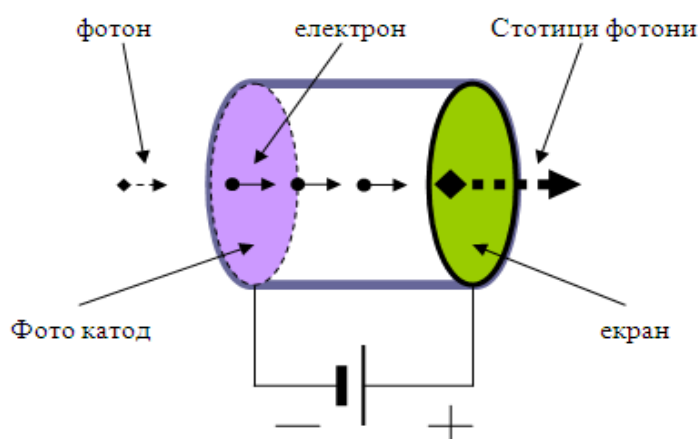
Параметрите на УНВ се определят от параметрите на оптоелектронния канал (обектив, ЕОП и окуляр). Оптичните системи – обектив и окуляр са добре познати и се използват в много оптични уреди. Това което отличава УНВ от останалите оптични уреди, е наличието на ЕОП. Принципът на работа на ЕОП и технологичното му развитие са съществени за настоящето изследване и ще бъдат разгледани по-подробно.

От теоретична гледна точка, всички ЕОП са изградени на базата физическото явление „фотоефект“. Фотоефектът е открит от Хайнрих Херц през 1887 година (Фулър & Фулър, 1988). Той се обяснява с взаимодействието на светлината енергия с метални повърхности, при което от повърхността се отделят електрони. Значителен принос за изясняване закономерностите на явлението фотоефект има руският учен Столетов, който е формулирал основните закономерности на фотоефекта (Гурский, 1989): 1) при облъчване с монохроматичен поток, броят на отделените за единица време и от единица повърхност електрони е пропорционален на интензитета на светлинният поток; 2) всеки конкретен фотокатод има червена граница на прекратяване на фотоефекта, която представлява светлина с определена дължина на вълната, при което светлина с по-голяма дължина на вълната не е в състояние да предизвика фотоефект; 3) максималната кинетична енергия на отделяне на електроните от фотокатода зависи линейно от честотата на светлината и не зависи от интензитета на светлината; 4) явлението фотоефект възниква едновременно с осветяването на фотокатода и е безинерционно. Така формулираните закони на фотоефекта не са в състояние да бъдат обяснени от електродинамиката на Максвел. (Максвел, 1954). Съгласно електромагнитната теория за разпространение на светлината, електромагнитна вълна с произволна дължина на вълната ще увеличава постепенно кинетичната енергия на електроните, докато те постепенно започнат да се отделят от повърхността на метала, което противоречи на факта, че фотоефектът е безинерционен. Според електродинамиката на Масуел, съществуването на червена граница на фотоефекта е принципно невъзможно. Пак според електродинамиката на Максвел, максималната кинетична енергия на отделените от повърхността на метала

електрони е в тясна зависимост от интензитета на светлината. Тези несъответствия между теорията и наблюдаваните експериментални факти показват, че е необходима промяна в теоретичните основи за природата на светлината. Причините и начинът на възникване на фотоэффекта са обяснени теоретично през 1905 г. в статия на Алберт Айнщайн (Айнщайн, 1988). Айнщайн предлага хипотеза, имаща за цел научно да обясни фотоэффекта. До този момент законите на фотоэффекта са били установени емпирично, но е отсъствало теоретично обяснение за механизма, по който възниква явлението. Айнщайн допуска, че светлината „се състои от краен брой локализирани в пространството кванти енергия, които се движат, без да се разделят на по-малки части, и могат да се поглъщат само като цели кванти” (Айнщайн, 1988).

1.1. Видове електронно-оптични преобразуватели

Основният елемент на всеки нощен уред, базиран на технология на усилване на светлината, е електронно-оптичният преобразувател (ЕОП), които чрез своите основни оптични, електрични и механични параметри, определя качеството на уреда като цяло (Еволюция уредов нощного видения). От наименованието на този елемент, се разбира, че той служи за превръщането на фотони в електрони и обратно. Основната роля на ЕОП е да усилва слаби светлини сигнали, респективно слаби светлини образи (Вълева, 1993). ЕОП представлява електронно-вакуумно устройство, което се основа на действието на външния фотоэффект. ЕОП преобразува оптичния образ, създаван върху фотокатода от рентгенови, ултравиолетови, видими или инфрачервени лъчи, в междинен електронен образ, а след това във видим образ върху флуоресциращ екран (Вълева, 1993). Важното в случая е, че това се извършва по аналогов начин, в реално време и паралелно в пространството. Това са трите основни показателя по които ЕОП се различава от всички цифрови преобразуватели на светлини сигнали и образи в електрически сигнали. Всеки ЕОП притежава няколко основни елемента, които задължително присъстват в неговата конструкция (Фиг.1.2).

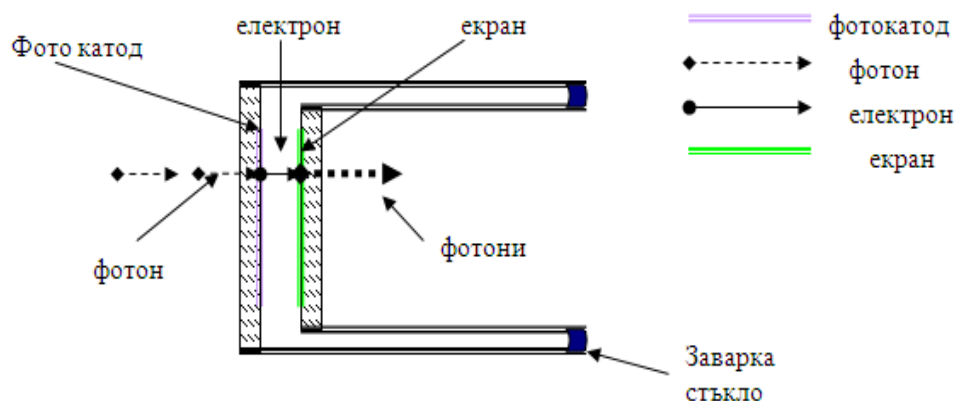


Фиг.1.2. Принцип на действие на ЕОП

Фотокатодът преобразува поток от движещи се фотони в поток от движещи се електрони. Екранът на ЕОП преобразува потока от движещи се електрони в поток от движещи се фотони. Основният корпус на ЕОП представлява стъкло или керамично

тяло, с формата на цилиндър, който е много добре затворен (това затваряне или запущване се нарича вакуумно-плътно) в двата края със стъклени, окръглени, плоско паралелни пластини, което позволява създаването и подържането на вакуум в обема на корпуса (Новое старое поколение). ЕОП спада към групата на електронно-вакуумните уреди, в устройството на които винаги присъстват най-малко два електрода, наричани анод и катод. Анодът и катодът са галванично свързани с източник на висок електрически потенциал. Екранът е галванично свързан с положителният полюс и изпълнява ролята на анод. Фотокатодът е галванично свързан с отрицателният полюс т.е. играе ролята на катод. Върху едната стъклена пластина, чрез метод на високо-температурно изпарение е нанесен тънък слой, състоящ се от различни по количество алкални елементи и това е причината тази пластина да се нарича мултиалкален фотокадод. Алкалните елементи са подбрани по такъв начин и в такива количествени отношения, които да осигурят максимален квантов добив на електрони, приемащи кинетичната енергия на попадащите върху пластината фотони от видимата част на електромагнитният спектър. Интересно е да се отбележи, че изработката на ефективен фотокадод е специфична научна високотехнологична задача с възможни различни решения, които когато са успешно получени от различните фирми и производители, се превръщат в „ноу-хау” или стават обект на безкомпромисна интернационална патентна защита, с цел търговия с лицензи. Върху другата плоско паралелна пластина е нанесен достатъчно тънък слой от луминофор, чрез методи на утаяване, изсушаване и втвърдяване, в условията на центрофугиране с високи обороти. Тази пластина се нарича екран и нейната функция е да превръща падащите с висока скорост електрони във вторични фотони във видимата част на спектъра.

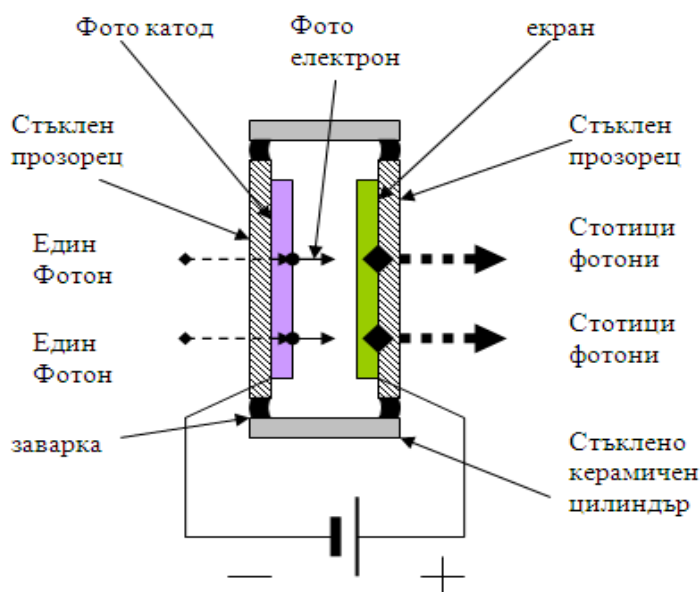
През тридесетте години на миналият век започва интензивна научно изследователска и развойна дейност, свързана практическото използване на явлението фотоефект. Първият ЕОП е разработен през 1934 г. от Дж. Холст съвместно с Зворкин и Мортон в изследователските лаборатории на Филипс, Холандия (Криксунов, 1778). Този ЕОП е станал световно известен под името “чашата на Холст”. Причината за това е неговата конструкция, която представлява две чаши с различен диаметър и плоски дъна, които са вложени една в друга. Върху вътрешната страна на дъното на голямата чаша е разположен фотокадод, а върху външната страна на дъното на малката чаша е разположен екрана. На Фиг. 1.3 е показан начинът, по който се извършва преобразуването на електроните във фотони, чрез използване на екран от луминофор. Крайните горни ръбове на чашите са били заварени един към друг и в затвореният обем, който се получава между двете чаши се осигурява вакуум. Приложеният между фотокадод и екрана високоволтов потенциал, създава електростатично поле, под въздействието на което формираното електронно изображение се пренася от фотокадод върху екрана на ЕОП. Фотокатодът, използван в чашата на Холст, е изработен от медно-цезиеви или сребърно-цезиеви окиси. Този фотокадод притежава сравнително ниска интегрална чувствителност в спектралния диапазон до 1.1 микрометра, с пик на интегралната чувствителност в синьо-зеления диапазон (около $60 \mu A/lm$), (Hamamatsu, 2000) и е известен като (S1) фотокадод.



Фиг.1.3. Чашата на Холст

В края на петдесетте и началото на шестдесетте години се появяват мобилни ЕОП, предназначени за военно използване, които по начина на своето действие са класически аналогови усилватели на слаби светлини образи, работещи в реално време. От тогава до сега работата в тази област не е прекратявана, а по отношение на своето качество, днешните уреди за нощно наблюдение са в пъти по-съвършени.

На Фиг. 1.4 е показана стъклена тръба, която в двата си края е затворена чрез окръглени стъклени пластини.



Фиг.1.4. Конструкция на ЕОП

Пластините са заварени за тръбата, което позволява вътре в обема на цилиндъра да се създаде дълбок вакуум. Върху вътрешната страна на една от пластините е нанесен тънък слой, съставен от различни алкални химически елементи. Този слой е електрически проводящ и към него е свързан галванично отрицателният електрод на източника на високо напрежение и се нарича фотокатод. Положителният електрод на източника на високо напрежение е галванично свързан с втората окръглената стъклена пластина, която затваря херметично другият край на стъклената тръба. Върху вътрешната повърхност на тази пластина е нанесен тънък електропроводящ слой от материал (луминофор), който притежава свойството

флуоресценция. В най-общ случай, това са химически съединения, които при облъчване с електрони или ултравиолетови лъчи, излъчват електромагнитни вълни във видимия диапазон на спектъра. Направената по този начин стъклена пластина, се нарича екран и изпълнява ролята на анод, върху който попадат електроните излъчени от фотокатода.

По същество, описаното по този начин устройство представлява електронно-вакуумен уред, приличащ на обикновените радиолампи, които се използват в радиотехниката за усилване на слаби електрически сигнали. Когато върху фотокатода попадне фотон, той се поглъща от материала и неговата кинетична енергия се оказва достатъчна, за да се отдели един електрон на някакво минимално разстояние от повърхността на фотокатода (фотоефект). Този електрон попада в електричното поле между фотокатода и екрана, което е породено от съществуващата между тях потенциална разлика. Отрицателно зареденият електрон започва да се движи с нарастваща скорост към положително заредения екран. Когато скоростта на електрона расте, расте и неговата кинетична енергия, в резултат на което, ударът на електрона върху екрана е причина да се появят стотици нови вторични фотони, които безпроблемно преминават през стъклената пластина (в този случай наричана стъклен прозорец) и могат да бъдат наблюдавани с невъоръжено око.

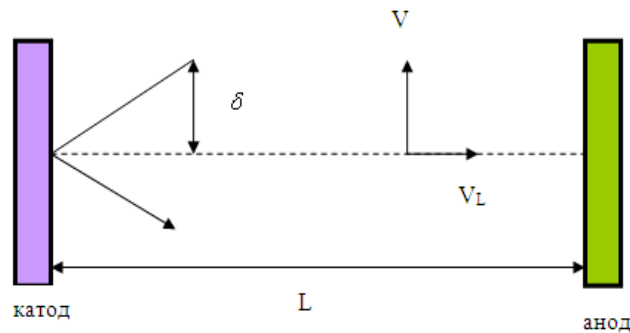
Светлинното усилването на такъв уред може да бъде изчислено чрез отношението на количеството на фотоните, напуснали екрана към количеството на фотоните, попаднали върху фотокатода:

$$(1.1) \quad K_{ус} = \Phi_{екран} / \Phi_{катод}$$

където: $K_{ус}$ – коефициент на усилване; $\Phi_{екран}$ – количество фотони, попаднали върху екрана; $\Phi_{катод}$ – количество фотони, попаднали върху фотокатода.

Може да се постави оптична система на определено разстояние пред фотокатода, така че фокалната равнина на обектива да съвпада с равнината в която се намира фотокатода. По този начин ще се фокусира някакъв конкретен оптичен образ върху фотокатода. Различно осветените участъци на този светлинен образ ще бъдат причина за отделяне на различно количество електрони от фотокатода и като резултат ще се получи електронен образ, който е еквивалентен на светлинния образ. Под въздействието на потенциалната разлика електроните започват да се движат към екрана успоредно един на друг. Когато попаднат върху екрана електроните ще предизвикат появяването на стотици пъти по-голямо количество фотони. Ще се получи светлинно-усилен образ, който е по-ярък, но който е съхранил своите геометрични размери и представлява копие на входящия светлинен образ. В общ случай, образът на изхода ще бъде усилен, но неясен и не добре фокусиран. Причината е, че различните електрони притежават различна напречна съставка на вектора на скоростта. На Фиг. 1.5 е показано в схематичен вид фотокатод и екран, намиращи се на разстояние L един от друг и с приложено захранващо напрежение.

Когато фотокатодът и екранът се намират на голямо разстояние един от друг, разсейването на вторичните електрони е голямо и тогава усиленият образ е силно разфокусиран и обратно, когато разстоянието между фотокатода и екрана е по-малко, вторичният образ на екрана е по-добре фокусиран.



Фиг.1.5. Посока и вектор на скоростта

Електрическият потенциал е причина за движението на електроните от фотокатода към екрана със скорост V_L . Една част от електроните се отклоняват в радиална посока със скорост V_r , в резултат на което върху екрана се появява светло петно с размер σ . Функционалните зависимости могат да бъдат представени по следният начин (Emmett, 2000):

$$(1.2) \quad \sigma = v_r \cdot t = \sqrt{\frac{2eV_r}{m}} \times 2L \frac{1}{\sqrt{\frac{2eV_L}{m}}} = 2L \sqrt{\frac{V_r}{V_L}}$$

където: σ е размер на отклонението на електрона, V_r е радиална скорост на електрона; t е време на движение на електрона, V_L е скорост на електрона, e елементарен заряд на електрона; m е маса на електрона, L е разстояние между фотокатода и екрана.

От (1.2) се вижда, че разсейването е право пропорционално на разстоянието между екрана и фотокатода. От друга страна, разстоянието между фотокатода и екрана определя усилването на ЕОП. Голямото разстояние осигурява голямо усилване като причината е, че електроните изминават по дълъг път в условията на потенциална разлика и получават по голяма кинетична енергия. Голямата кинетична енергия е причина за появяване на голямо количество вторични фотони. И обратно, намаленото разстояние между фотокатода и екрана създава електрони с ниска кинетична енергия и резултатът е слабо усилване. Това са две взаимно изключващи се зависимости. Един от начините за разрешаване на това противоречие е намаляване разстоянието между фотокатода и екрана и едновременно с това, увеличаване на захранващото напрежение, приложено върху фотокатода и екрана. Намаляването на разстояние води до по-малко разсейване на електроните и по-добре фокусирана светлинна картина, а с увеличението на потенциалната разлика се получава по-голяма кинетична енергия на електроните и повишаване на усилването. Като пример в това отношение могат да бъдат посочени разработките на фирмата „Прокситроникс” (Image-intensifier-general-information), където се използват подобни методи при конструирането и производството на ЕОП, предназначени за научни изследвания, свързани с регистрирането и усилването на свръх слаби светлинни сигнали и образи, в режим на единично броене на фотони (Seitz и Theuwissen, 2011).

Математическият израз, който показва зависимост на размерите на разсейването като функция на разстояние между фотокатода и екрана, електрическият потенциал между екрана и фотокатода и отделителната работа, извършена от електрона е (Криксунов 1978):

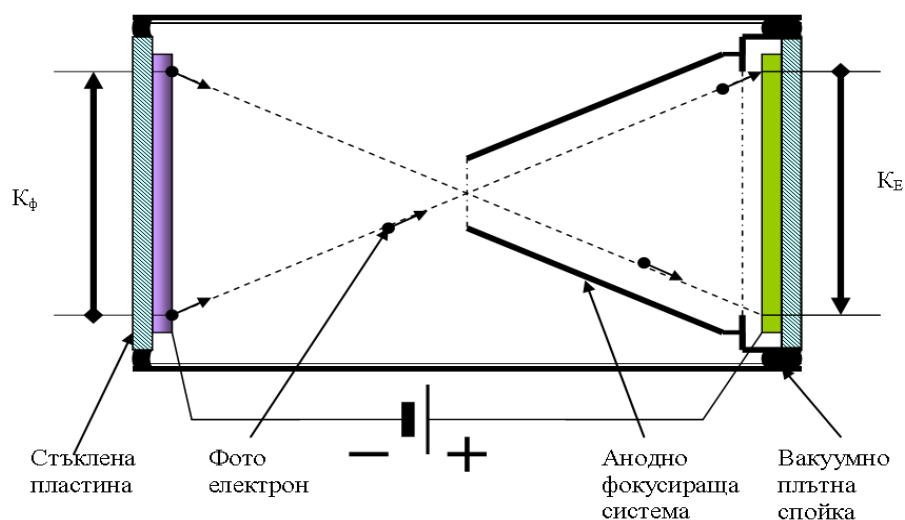
$$(1.3) \quad d_o = 4L \sqrt{\frac{U_{el}}{U_a}}$$

където: d_o – диаметър на светлото петно; L – разстояние между фотокатода и екрана; U_a е потенциала между екрана и фотокатода; U_{el} – отделителната работа, извършена от електрона.

Важно е да се отбележи, че с намаляването на разстоянието между фотокатода и екрана се създава реална опасност от високоволтов електрически разряд (пробив), при което настъпват необратими поражения върху фотокатода и екрана.

1.1.1. ЕОП с електростатично фокусиране

Чрез електростатичното фокусиране се създават условия за внасяне на корекции в насоченото движение на електроните, които се движат от фотокатода към екрана. Физическата същност на явлението се състои във факта, че екипотенциалните повърхности, създадени от електрично поле са аналогични на повърхността на елементарен стъклен оптичен елемент или обектив. Препреминавайки през повърхността на оптична система, светлинният лъч се пречупва и променя посоката си. По същият начин, когато електрон препреминава през екипотенциална повърхност с определена форма, неговата посоката също се променя по определен начин. Пречупването на електронен лъч е еквивалентно на явлението пречупване на светлинен лъч, което означава, че законите на движението на електрон в електрично поле и фотон в оптични среди с различен коефициент на отражение и пречупване са еднакви. Това позволява да бъдат изчислявани подходящи конфигурации на електростатични полета, които са в състояние да фокусират по определен начин електронни снопове. Електростатичните фокусиращи системи се изработват от високолегирани стомани или сплав на никел с други черни метали. Те притежават различни форми и размери, в зависимост от изискванията, които се поставят към тях и задачите които трябва да изпълняват. В българската техническата литература се използва понятието анодно-фокусиращи системи (АФС). Причината е, че електростатичната фокусираща система е галванично свързана с екрана, който е свързан към положителния полюс на хранявания източник и изпълнява ролята на анод. Основният елемент, който задължително присъства във всяка АФС, представлява метална повърхност във вид на пресечен конус при което екрана е разположен в равнина, успоредна на голямата основа на пресеченият конус, както е показано на Фиг. 1.6. В някои конкретни случаи към АФС се поставят специфични изисквания и тогава е възможно електрическият потенциал на екрана да бъде различен от електрическия потенциал на фокусиращата система. Такава схема се реализира чрез използване на съпротивителни делители на напрежение, които се проектират да работят в определен токов режим. При своето движение от фотокатода към екрана, част от електроните препреминават през тесният отвор на върха на конуса и се насочват към екрана. По този начин се оформя електростатична електронна бледа, която въздейства върху електроните, по същият начин по който оптичната бледа въздейства на движението на фотоните. Като се вижда от Фиг 1.6, светлинният образ, получен върху фотокатода, е инвертиран (завъртян на 180 градуса) спрямо светлинния образ.



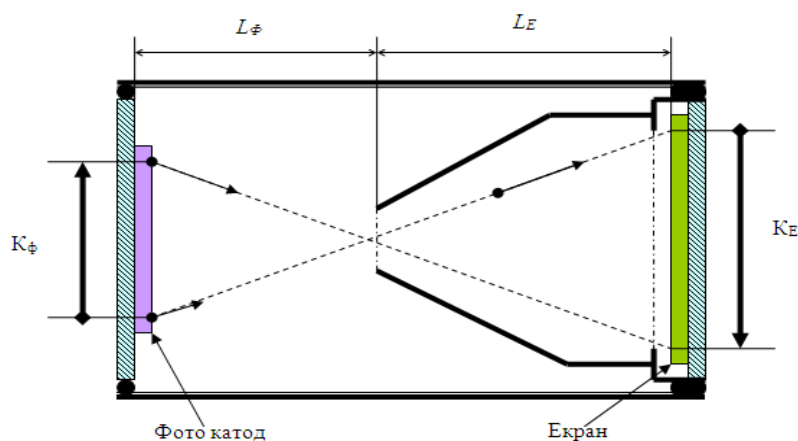
Фиг. 1.6. ЕОП с АФС

Завъртането на образа е симетрично по отношение на централната оптична ос на ЕОП и в такива случаи се използва термина инвертираща анодно-фокусираща система (ИАФС). Използването на АФС повишава разделителната способност на ЕОП особено в центъра на зрителното поле, при което тези стойности са няколко пъти по-големи от разделителната способност на ЕОП, които не използват АФС. С увеличаване на разстоянието от центъра на екрана, разделителната способност намалява и в далечната периферна област тя обикновено е по-малка от тази на „близко фокусни“ ЕОП (ЕОП без АФС). Това се дължи на влошената хомогенност на електричното поле, създавано от АФС, което е причинено от ограничения във физическите размери, предявявани към големината и теглото на УНВ. Съществуват разнообразни конструкции на АФС, които изпълняват специфични изисквания и излизат извън рамките на общите изисквания. Като пример може да бъде посочено, че са разработени и се произвеждат серийно ЕОП, при които АФС има формата на пробит цилиндър, който е с два различни по големина отвора, намиращи се върху двете основи на цилиндъра. В равнината на големия отвор се намира екрана, докато малкият отвор е насочен към фотокатода и равнината в която се намира е успоредна на фотокатода. Типичен пример в това отношение е руският ЕОП с търговско означение В8, чието серийно производство за граждански цели в последно време нарасна многократно. В практиката могат да бъдат срещнати серийно произвеждани ЕОП с АФС, която представлява пресечен конус с прикрепен към върха на пресечения конус двойно пробит цилиндър. Това запазва входния размер на електронната бленда и удължава разстоянието между фотокатода и екрана, като целта е да се увеличи пробегът на електроните в хомогенно електрично поле и по този начин да се подобри електронното фокусиране в периферията на екрана.

1.1.2. ЕОП с оптично увеличение

Чрез използването на електростатична АФС се създават възможности за промяна на геометричните размери на получавания върху екрана светлинен образ. Това позволява да се въведе параметъра оптично увеличение на ЕОП по аналогия с параметъра коефициент на оптично увеличение, който се използва в класическата оптика. Оптичното увеличение на ЕОП може да бъде по-голямо от единица, равно на

единица или по малко от единица и се определя от размерите на АФС и от положението на електронната бленда по отношение на фотокатода и екрана. В общия случай, с отдалечаването от фотокатода и с приближаването до екрана, оптичното увеличение намалява и обратно. На Фиг. 1.7 е показан ЕОП с оптично увеличение по-голямо от единица.



Фиг.1.7. ЕОП с АФС и оптично увеличение

Тесният отвор на АФС, който изпълнява функцията на електронна бленда се намира на определено разстояние между фотокатода и екрана, за което е изпълнено условието:

$$(1.4) \quad L_E/L_\phi > 1$$

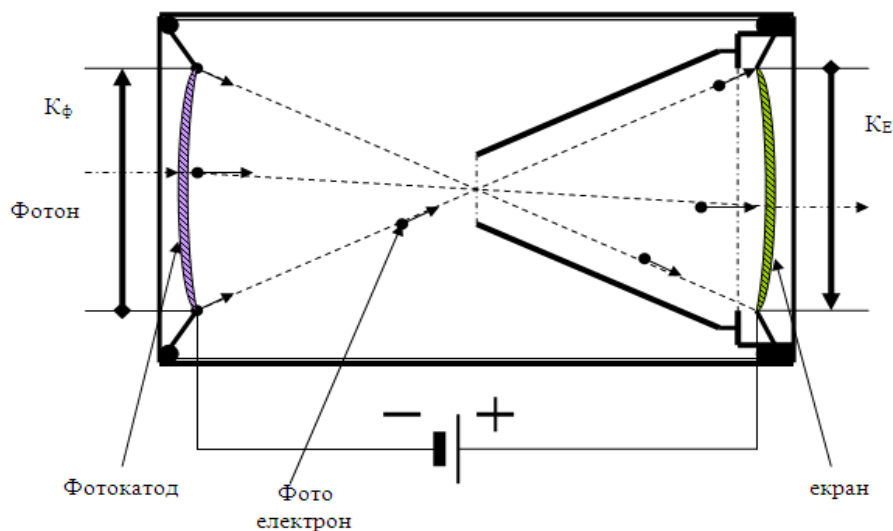
Тогава:

$$(1.5) \quad K_E/K_\phi > 1$$

където: K_ϕ е геометричният размер на светлинния образ, проектиран върху фотокатода; K_e е геометричният размер на светлинния образ върху екрана.

Чрез използването на различни видове електронни бленди и чрез изменение на тяхното местоположение в затворения обем на ЕОП, е възможно да бъдат получени сравнително широка гама различни оптични увеличения (в интервала от $K=0.1$ до $K=3$). При по-големи стойности на K , ако не са предприемат специални мерки, се влошава разделителната способност на ЕОП.

Необходимо е да се отбележи, че електронната бленда не е еквивалентна на класическата оптична бленда. Основната разлика е, че положението на оптичната бленда (освен ако не се вземат специални мерки) практически не оказва влияние на оптичното увеличение на конкретната оптична система, докато промяната на положението на електронната бленда (разстоянието до екрана) оказва съществено влияние на оптичното увеличение на ЕОП. Инвертиращата АФС притежава още едно свойство, характерно за голяма част от класическите оптични системи. Фокалната равнина на електростатичната фокусираща система е радиално симетрична спрямо оптичния център на системата, което означава, че мястото където се появява фокусиран образ не е разположено в една равнина и представлява повърхност с променлив радиус. Това е в сила както за предната, така и за задната фокална повърхност. Следователно, за получаването на фокусиран електронен образ е необходимо той да бъде разположен върху сферичната повърхност (Фиг. 1.8).

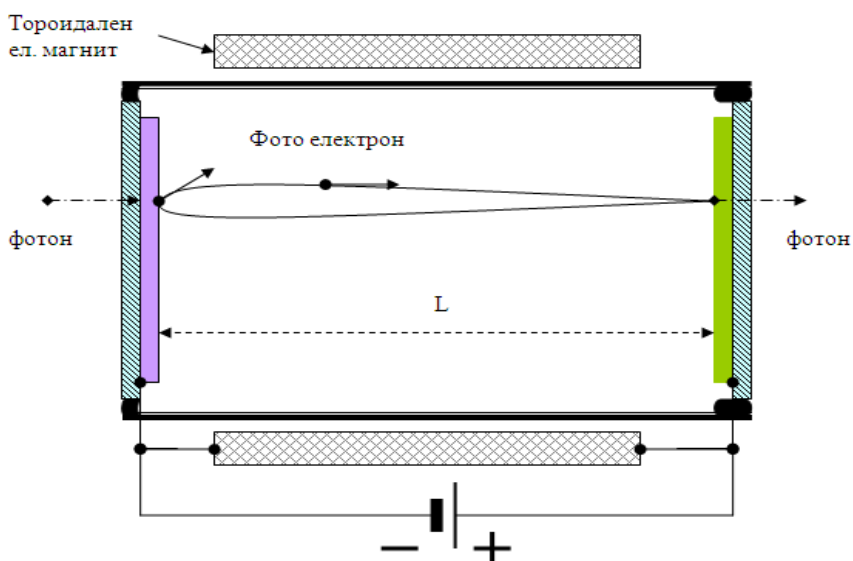


Фиг. 1.8. ЕОП с плоско вдлъбнати вход и изход

Такава конструкция позволява получаването на ясен светлинен образ върху екрана. Прецизното оразмеряване на ЕОП, който е в състояние да реализира предварително зададени технически характеристики е трудна изчислителна, техническа и технологическа задача. Процесът на създаване и изработка на добре работещ ЕОП е съпроводен с множество лабораторни експерименти, анализи на резултати от експерименти, корекции на размерни вериги и многократни технологични промени. Това е класически вариант на работа по метода на пробите и грешките и в това направление са скрити големи възможности за оптимизация на целият процес.

1.1.3. ЕОП с магнитно фокусиране

Третият начин, по който е възможно да се получи висока степен на фокусиране на електронен лъч, е чрез използването на подходящо магнитно поле. Магнитното поле е така ориентирано спрямо движението на електроните, че намалява радиалните компоненти на скоростта на електроните (Фиг. 1.9)



Фиг.1.9. ЕОП с магнитно фокусиране

С непрекъсната линия е показано *преместването* на електроните, тръгващи от една начална точка, която се намира върху фотокатада, и пристигащи отново в една крайната точка, която се намира върху екрана. Истинските траектории на движението на електроните в магнитно поле представляват спирали, за които е характерно че се пресичат в определени точки. Точките са разположени върху една права линия, която съвпада с оптичната ос, и са строго периодични. Реципрочната стойност на този период, е т.нар. Ленгмюрова честота. Фотокатада и екрана са разположени на разстояние L в равнини, които са успоредни по между си и между тях е приложен електрически потенциал V . Целият ЕОП е поставен в централният отвор на радиално симетричен тороидален електромагнит, върху който е приложено подходящо електрическо захранване. Посоката на вектора на магнитното поле е такава, че допълнително ускорява електроните, движещи с към екрана, като по този начин се увеличава светлинното усилване. За да се получи електромагнитно фокусиране на електроните, е необходимо да е изпълнена зависимостта (Emmett, 2000):

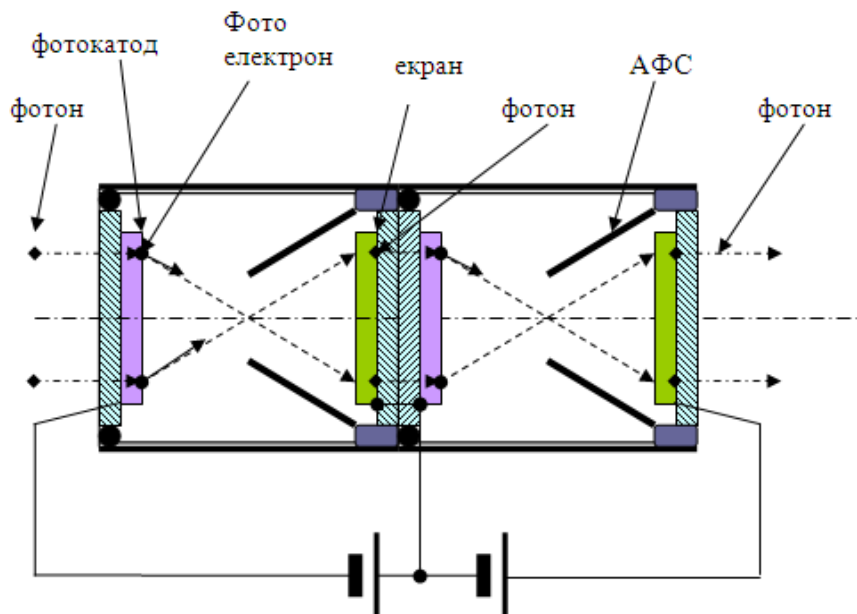
$$(1.6) \quad L = \frac{\pi}{B} \sqrt{\frac{2mV}{e}}$$

където: L – разстоянието между фотокатод и екрана; π е числото 3,14; $B_{\text{магн}}$ – магнитна индукция; m – масата на електрона; e – елементарен електрически заряд на електрона; V – скорост на електрона.

Чрез използването на този метод е възможно да се получат много добри резултати. При прецизно оразмеряване и фини настройки, разделителната способност на ЕОП с комбинирано електростатично и електромагнитно фокусиране, нараства до 100 lp/mm в центъра на екрана. Използването на ЕОП с електромагнитно фокусиране в практиката се среща сравнително рядко и се прилага предимно в областта на астрономията и/или за специфични научноизследователски дейности. Причината за това е, че за да се получи висока и стабилна във времето разделителна способност, е необходимо да се използват специално конструирани електромагнити или постоянни магнити, които понякога са с доста екзотични форми. И в двата случая се получават устройства с повишен обем и значително тегло. По-високото тегло, създава предпоставки за настъпване на механични дефекти при ускорения, удари и вибрации. При шокова промяна на температурата, например от $-50^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$ се създават значителни нелинейни механични деформации, които рязко влошават качеството на фокусирането. Тези особености са причина за техният нисък коефициент на надеждност.

1.1.4. Каскадни ЕОП

Конструкцияте, описани до сега позволяват усилване до няколко стотици пъти. За практически нужди често се налага да бъдат наблюдавани или регистрирани изключително слаби светлинни потоци. За да бъдат визуализирани е необходимо усилване от хиляди и десетки хиляди пъти. Един от начините за осъществяване на това е чрез използването на каскаден ЕОП (Фиг. 1.10). Както се вижда от Фиг. 1.10, това са два инвертиращи ЕОП, поставени един до друг, така че екранът на първия ЕОП да осветява фотокатада на втория.



Фиг. 1.10. Принципно устройство на двукаскаден ЕОП

Светлинният образ се усилва от първия ЕОП, след което се проектира върху фотокаатода на втория и се усилва още веднъж. Общият коефициент на усилване на каскадния ЕОП представлява произведение от усилването на всеки един ЕОП, участващ в каскадната конструкция:

$$(1.7) \quad K_{\text{общо}} = K_1 K_2 K_3 \dots K_p$$

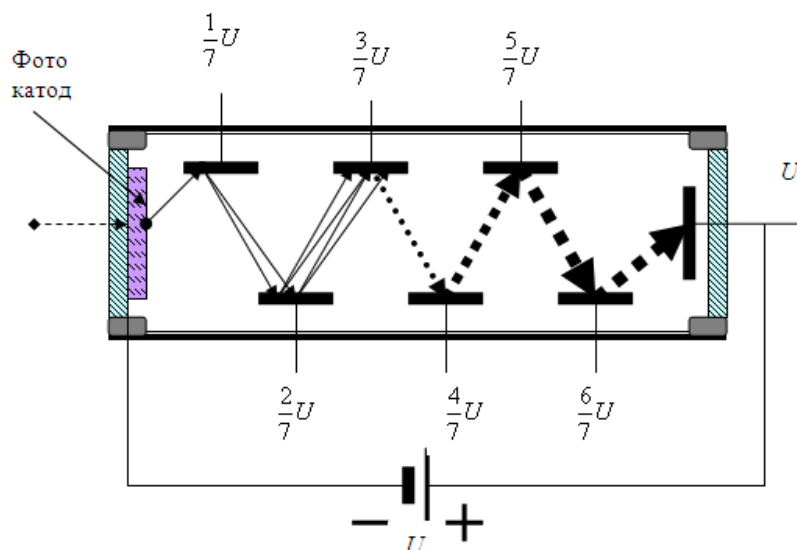
където: K_1 е усилването на първия ЕОП; K_2 е усилването на втория ЕОП; K_p е усилването на последния ЕОП; p е броя на ЕОП.

По този начин могат да бъдат постигнати стойности на усилване от хиляди пъти. Увеличаването на броя на ЕОП в каскадата, увеличава топлините шумове на цялата каскада. Шумът на първия ЕОП се усилва от втория и се появява върху екрана на втория, като ефект на видимо засилени сцинтилации, което в крайна сметка ограничава усилването. Всеки един ЕОП, участващ в каскадата, инвертира еднократно светлинният образ на 180 градуса. Ето защо, четен брой на използваните ЕОП реализира на изхода „прав“ светлинен образ, а нечетен брой води до „обърнат“ или инвертиран образ. В практиката най-често се използват два и три каскадни ЕОП. Един от най-известите три-каскадни ЕОП е руският ЕП42, който се използва в нощен стрелкови мерник 1ПН34 за карабина „Драгунов“ и автомат АК 47. Усилването на каскадния ЕОП може да достигне стойности от няколко десетки хиляди пъти. Съществен недостатък на каскадния ЕОП са повишените геометрични размери и значителното тегло. Тези два недостатъка се отстраняват чрез използването на ЕОП с микроканални пластини (МКП), които работят чрез използване на физическото явление вторична електронна емисия.

Вторична електронна емисия. Фотоелектронен умножител

Същността на явлениято вторична електронна емисия се състои в увеличаване количеството на електрони, които се движат в една и съща посока под въздействието на електрическо поле, възникващо между два електрода. Електродите са свързани галванично с източник на висок електрически потенциал. Този принцип на работа се

използва във фотоелектронните умножители (ФЕУ), които в този смисъл са прародителят на микроканалната пластина. ФЕУ спада към групата на електронно-вакуумните лампи и уреди (ФЕУ 6М). Представлява стъклен цилиндър, от който е изтеглен въздуха и се поддържа дълбок вакуум по аналогия на обикновените радиолампи. Принципно устройство на ФЕУ е показано на Фиг. 1.11.



Фиг. 1.11. ФЕУ – принцип на действие

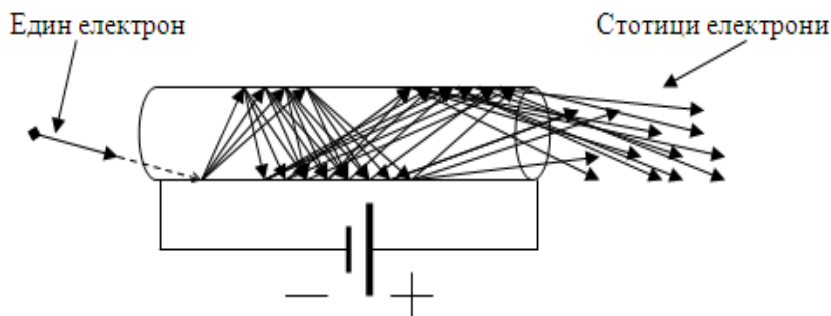
За разлика от радиолампите, катодът на ФЕУ е „студен“ (не се погрява принудително) и е чувствителен на въздействие на светлина. В този случай отново се използва явлението фотоэффект и по същество това е почти същият фотокатод, който се използва в ЕОП. Анодът на ФЕУ представлява класически метален електрод, като катодът и анодът са галванично свързани с източник на висок електрически потенциал (анодът е положителен, а катодът е отрицателен). Между анода и фотокатода са разположени електроди, които се наричат диноди. Върху динодите са приложени различни потенциални, които нарастват равномерно и стъпково в посока от катода към анода. Конкретните стойности на електрическия потенциал на всеки динод се определят от съпротивителен делител на напрежение, който е оразмерен в съответствие с изискванията и индивидуалните заводски спецификации. Когато единичен фотон (или слаб светлинен поток) попадне върху фотокатода, неговата кинетична енергия се преобразува в енергия на отделяне на електрон от фотокатода. Под въздействието на приложен електрически потенциал, електронът започва да се движи с ускорение към първия динод. Неговата кинетична енергия нараства и когато попадне върху динода успява да отдели няколко нови електрона, наречени „вторични“. Вторичните електрони започват да се движат с ускорение към по-високия положителен потенциал на втория динод. Тяхната енергия нараства и когато попаднат върху динода, всеки един от тях избива по няколко нови електрони, които започват да се движат към третия динод. Този процес се повтаря толкова пъти, колкото е количеството на динодите, като започва от фотокатода и се прекратява върху анода на ФЕУ. Това стъпково увеличаване на количеството на движещите се електрони представлява усиление на електрически ток чрез вторична електронна емисия.

Коефициентът на усилване на целия уред може да се представи като произведение от коефициентите на усилване на всеки отделен динод.

$$(1.8) \quad K_{\text{общ}} = K_1 K_2 K_3 \dots K_n$$

където: $K_{\text{общ}}$ е коефициент на усилване на целият ФЕУ; K_i е коефициент на усилване на i -тия динод.

Разновидност на динодният ФЕУ е канално-тръбовидния умножител - конструкция, представляваща тръба от изолационен материал, в двата края на която е приложен подходящ електрически потенциал (Фиг. 1.12.).

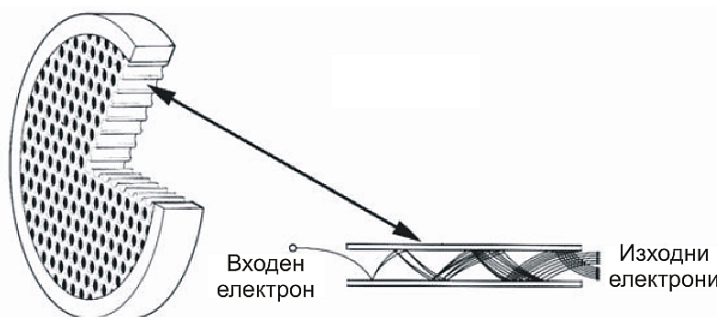


Фиг. 1.12. Канално-тръбовиден умножител

Вътрешната част на тръбата е покрита с материал, който е в състояние да реализира явлението вторична електронна емисия. Когато електрон попадне в отвора на тръбата (Фиг. 1.12), той започва да се движи под действието на приложеното електростатично поле към изхода на тръбата, която е с положителен електрически потенциал. Кинетичната енергия нараства и при сблъсък със стената на тръбата се отделят множество нови електрони с по-ниска кинетична енергия. Този процес се повтаря неколkokратно докато електроните напуснат тръбата. Изградените на този принцип ФЕУ се наричат канални (или тръбовидни).

Микроканална пластина

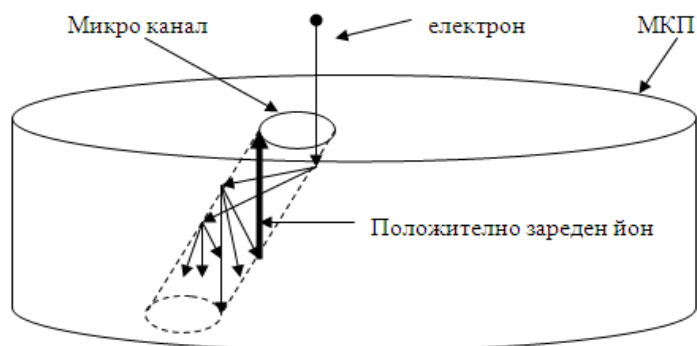
На Фиг. 1.13 е показан външния вид и начинът, по който се увеличава количеството на електроните в микроканалната пластина (МКП), (Hamamatsu image intensifiers, 2009):



Фиг. 1.13. Устройство на МКП

По дефиниция, микроканалната пластина, представлява съвкупност от еднакви, равномерно разположени, канални (тръбни) вторични електронни умножители,

термично споени във вид на пластина с цилиндрична форма и с нанесени контактни електроди върху двете кръгли основи на цилиндъра (Технически характеристики на МКП). Както се вижда от самата дефиниция, работата на МКП се свежда до физическото явление усилване на ток чрез вторична електронна емисия. Всяка микротръбичка, участваща в изграждането на микроканалната пластина, представлява самостоятелно действащ миниатюрен, тръбовиден (канален) ФЕУ. В този смисъл МКП може да се разглежда като съставена от голямо количество малки фотоелектронни умножители, подредени успоредно един до друг. Диаметърът на микроканалите, които се използват е от 4 - 6 микрона до 10 - 12 микрона. Количеството на микроканалите в пластина със стандартен работен диаметър 18 mm е 10 - 12 милиона. Двете кръгли основи на МКП са метализирани и са галванично свързани с източник на електрически потенциал. Метализирането на входа и изхода на микроканалната пластина има за цел осъществяването на няколко важни функции. Първо, по този начин се създава хомогенно електростатично поле между входната и изходната повърхност, което е необходимо за реализиране на еднакъв коефициент на усилване на микроканалите на пластината. При нехомогенно поле, микроканалите, които се намират по периферията ще притежават по-голям коефициент на усилване от тези в центъра. Резултатът от това ще бъде появяване на тъмно петно в средата на екрана. Второ, входът на МКП се предпазва от единични високоенергийни електрони, които се движат с висока скорост от фотокатода към МКП. Тънкия метален слой отнема част енергията и по този начин предотвратява повреждането на конкретен микроканален умножител. Трето, металният слой нанесен върху входа на МКП изпълнява ролята тоководеща верига за положителните метални йони, които се появяват във вътрешността на единичният канално-тръбен умножител. Тези йони се явяват в момента на удара между електрона и стената на микроканала и представляват молекули и атоми на материала, който е източник на вторична електронна емисия. Йоните започват да се движат в посока към входа на МКП срещу потока на вторичните електрони. Това по същество е ток, който е обратен на тока в МКП и влошава нейните технически характеристики. За да се избегне това нежелано явление, микроканалите на пластината се проектират и произвеждат така, че да сключват определен ъгъл с нормалата към входа и изхода на пластината, както е показано на Фиг. 1.14.

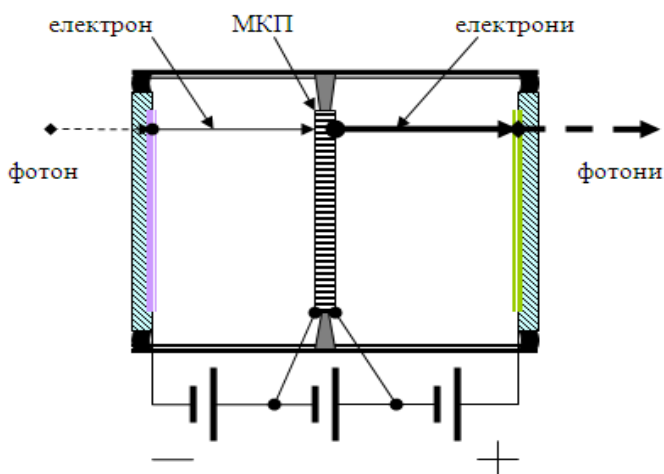


Фиг. 1.14. МКП. Наклон на микроканал. Обратен йонен ток.

По този начин се увеличава вероятността положително заредените йони отново да се ударят в стената на микроканала и да неутрализират своя положителен потенциал. След неутрализацията върху тях престава да действа силата на електростатичното поле и те остават закрепени върху стената на микроканала. Друг начин, по който може да се неутрализира обратният йонен ток в МКП, е когато тръбичките на МКП са направени във вид на закривен цилиндър. При своето праволинейно движение в посока на отрицателния потенциал йоните попадат върху стените на закривената микро-тръба и се неутрализират.

Усилване на ЕОП с МКП

Чрез промяна на електрическия потенциал се променя усилването на МКП в граници от нула до няколко хиляди пъти. Типичните стойности на работното напрежение зависят от конструктивните механични и електрически характеристики на МКП. Това е един от основните параметри на всяка конкретна МКП и винаги присъства в заводските спецификации. Неговата стойност се движи от порядъка няколко стотин волта до 1300 V. На Фиг 1.15. е показан принципът на действие на ЕОП с МКП.



Фиг. 1.15. ЕОП с МКП

Светлинният образ се проектира върху фотокатода, където се превръща в електронен образ, който се пренася паралелно върху входа на МКП. Електроните навлизат в микроканалите под въздействието приложен електрически потенциал. В резултат на многократна вторична електронна емисия, количеството на електроните излизащи от изхода на МКП е хиляди пъти по-голямо. По този начин се получава усилване на електронният образ (Hamamatsu image intensifiers, 2009). Електроните продължават своето движение към екрана, където в резултат на явлението луминисценция, се получава отново светлинен образ, който е многократно по-ярък от входният оригинал.

В световен мащаб не съществуват строго регламентирани стандарти за производство на МКП. Основната причина за този факт най-вероятно е, че производството на качествени МКП е високотехнологична дейност, свързана с идеята за запазване на авторските права. Най-често срещаните МКП са с кръгла форма, но по поръчка се произвеждат квадратни и правоъгълни, с различни размери. Типични

размери на кръгли МКП са: 16 mm; 18 mm, 25 mm, 40 mm, 75 mm, 150 mm (Photek image intensifier; ProxiVision image intensifier; Hamamatsu image intensifiers; Image-intensifier-details PROXITRONIC).

1.2. Поколения ЕОП

Към днешна дата, в световен мащаб са разработени и са в серийно производство широка гама от различни модели ЕОП за уреди за нощно виждане. (Image intensifiers – products catalog). Те са предназначени за различни цели и задачи в сферата на промишлеността, военното дело, охранителната дейност, научните изследвания и др. Това разнообразие извиква на дневен ред необходимостта от принципи и начини чрез които е възможно класификацията на различните ЕОП в съответствие с конкретните качествени характеристики. В тази връзка може да се отбележи, че самото технологично развитие и усъвършенстване на ЕОП предлага една естествена градация, която е свързана с годините и хронологията на явяващите се принципно нови и различни едно спрямо друго технически решения и нововъведения. Този подход е определил четири основни групи от ЕОП, където всяка една от групите се нарича поколение (generation), което се бележи с главни букви от латинската азбука GEN и веднага след това римски цифри нула едно две или три.

ЕОП от нулево поколение (GEN 0), прародителят на съвременните ЕОП-и, притежаващ ниски технически характеристики и висока степен на оптични изкривявания (аберации) (Night Vision Devices – Generations). Представлява стъклен цилиндър, запушен от двете страни, от който е изтеглен въздух и по този начин е осигурен дълбок вакуум. Двете основи на цилиндъра, са окръглени, плоско-паралелни стъклени пластини, които от своя страна са строго успоредни по между си. Класически пример в това отношение е „чашата на Холст”. Това е първият ЕОП, който е създаден през 1934 г. от Холст и сътрудници в лабораториите на Филипс. Върху едната пластина, чрез метод на високо температурно изпарение, е нанесен тънък слой състоящ се от различни по количество алкални елементи и това е причината тази пластина да се нарича мулти-алкален фотокатод. Алкалните елементи са подбрани по такъв начин и в такива количествени отношения, които осигуряват максимален квантов добив на електрони, приемащи кинетичната енергия на попадащите върху пластината фотони от видимата част на електромагнитният спектър. Интересно е да се отбележи, че изработката на ефективен фотокатод е специфична научна и високотехнологична задача с възможни различни решения, които когато са успешно получени от различните фирми и производители, се превръщат в ноухау или стават обект на безкомпромисна интернационална патентна защита, с цел търговия с лицензии. Върху другата плоско-паралелна пластина е нанесен достатъчно тънък слой от луминофор, чрез метод на утаяване, изсушаване и втвърдяване в условията на центрофугиране с високи обороти. Тази пластина, наречена екран, има за задача да превръща падащите с висока скорост електрони във вторични фотони във видимата част на спектъра.

ЕОП първо поколение (GEN 1). ЕОП от първо поколение се различават от ЕОП нулево поколение по своята конструкция и параметри. Използват се влакнесто-оптични елементи и АФС. В резултат на това се получава по-висока разделителна

способност и по-голям коефициент на усилване. Типична стойност за коефициент на усилване е около сто пъти при разделителна способност 20-30 lp/mm (Night Vision Devices – Generations).

ЕОП второ поколение (GEN2). ЕОП от второ поколение се различава от ЕОП първо поколение по наличието на МКП. Резултатите са повишено усилване и повишена разделителна способност. Типични стойности за усилването са 5000-10000 пъти и разделителна способност 30-35 lp/mm (Night Vision Devices – Generations). При ЕОП от второ поколение най-често се използва мултиалкален фотокатод. Интегралната чувствителност на този фотокатод се движи в границите от 200 $\mu A/lm$ до 800 $\mu A/lm$. ЕОП от второ поколение се делят на няколко под групи GEN 2+, GEN 2++, GEN 2+Супер, GEN 2+хипер. Разделението не е стандартизирано и не е задължително за производителите на ЕОП. Възможни са незначителни отклонения на параметрите на ЕОП, принадлежащ към някоя от подгрупите, в зависимост от конкретният производител.

ЕОП трето поколение (GEN 3). ЕОП от трето поколение се различава от ЕОП второ поколение по типа на фотокатода. Фотокатодът на този ЕОП е “твърдотелен”. Използваният материал е галиев арсенид и технологията на изработката се различава принципно от алкалния фотокатод на ЕОП второ поколение (ИТТ, 2008). Интегралната чувствителност е в границите от 1200 $\mu A/lm$ до 2800 $\mu A/lm$ (Night Vision Devices – Generations).

Съществува ли ЕОП четвърто поколение (GEN 4)? Във връзка с класификацията на ЕОП в *четири групи*, (поколения 0, 1, 2, 3) се налага да се отбележи, че в литературата се срещат твърдения за съществуването на ЕОП от четвърто поколение. В този случай, като правило, към ЕОП е прикрепена CCD-матричен фотоприемник. Това дава основание на някои автори да обявят такива ЕОП за GEN 4. Подобен подход не се приема от много изследователи в областта, като се има предвид основната дефиниция на ЕОП - електро-вакуумен уред, който преобразува и усилва светлинен образ. Принципно важно в този случай е, че това преобразуване и усилване е аналогово, паралелно и се извършва в реално време. Всяка промяна на този принцип, свързана с добавянето на средства за цифровизиране и по нататъшна последователна цифрова обработка на образа, излиза извън рамките на дефиницията за ЕОП.

Във връзка с поколенията на ЕОП, възниква въпросът по какво се различава трето поколение ЕОП от второ поколение? Обикновено отговорът е, че трето поколение ЕОП е с фотокатод, който е направен от галиев арсенид, а второ поколение е с фотокатод, който е направен от алкални елементи. Съществената разлика обаче е, че катодите второ поколение се различават от фотокатодите трето поколение по начина на изработка. Технологиите са принципно различни. Мултиалкалният фотокатод се изработва по метода на високотемпературно изпарение на алкални метали в условията на дълбок вакуум. Полученият по този начин фотокатод, представлява кондензирани метални пари върху стъклена плоско паралелна пластина. По този начин металния слой на фотокатода е плътно прилепнал към стъклото. Мултиалкалният фотокатод има аморфна структура и е силно устойчив на механични удари и вибрации. Фотокатодът от галиев арсенид притежава кристална структура и

затова се нарича твърдотелен. Той представлява множество микро-кристалчета, които по механичен начин трябва да бъдат залепени за стъклена плоско-паралелна пластина. Фотокатодът, изработен по този начин, е силно чувствителен към механични удари и вибрации и затова се вземат специални мерки за подобряване на неговата здравина.

1.3. Основни параметри на ЕОП

1.3.1. Чувствителност

Чувствителността на ЕОП е параметър, който показва в каква степен и колко ефективно се преобразува светлината в електрически ток. При това преобразуване основна роля изпълнява фотокатодът. Високоэффективните катоди определят висока чувствителност на ЕОП. В заводските спецификации присъстват два вида чувствителност: интегрална и спектрална. Интегралната чувствителност S_i представлява отношението на величината на фототока към величината на светлинният поток, който е попаднал върху фотокатода. Измерва се в лабораторни условия чрез използването на стандартен светлинен източник тип *A* (лампа с нажежаема волфрамова жичка). При определено стандартно напрежение през лампата протича определен стандартен ток при стандартна цветна температура $T = 2856^\circ\text{K}$. Зависимостта между температурата и излъчвания спектър се описва чрез закона на Планк за излъчване на абсолютно черно тяло. Интегралната чувствителност се измерва чрез отношението ампер/лумен. В заводските спецификации се задава като микроампери на лumen ($\mu\text{A/lm}$). Стойността на интегралната чувствителност зависи от вида на фотокатода и се движи в границите от 100 до 2800 $\mu\text{A/lm}$.

Отношението на фототока към светлинен поток, постъпващ от източник на монохроматична светлина, представлява спектралната чувствителност на ЕОП. Силата на монохроматично излъчване се определя като мощност на светлинния поток, измерва се във ватове и поради това в спецификациите се задава в $\mu\text{A/W}$. Измерванията се провеждат при две стандартни стойности на дължина на вълната на монохроматичното светлинно излъчване – за 800 nm и за 850 nm. Типичните стойности за съвременните ЕОП се движат между 40 $\mu\text{A/W}$ и 80 $\mu\text{A/W}$.

1.3.2. Светлинно усилване

Отношението на големината на входящия светлинен поток към големината на изходящия светлинен поток изразява коефициента на усилване на ЕОП, който е в границите от 100 до 100 000 пъти:

$$(1.9) \quad K = \Phi_{\text{изх}} / \Phi_{\text{вх}}$$

Стойността зависи от конструкцията на ЕОП, като високите стойности се отнасят за ЕОП с една или повече МКП, докато ниските стойности се отнасят до ЕОП без МКП (Night Vision Devices – Generations).

1.3.3. Разделителна способност на ЕОП

Разделителната способност на ЕОП с МКП се определя основно от диаметъра и разстояние на отделните микроканали на МКП. При диаметър на микроканала (6 μm),

разделителната способност в централната част на екрана е в границите на 45 – 55 lp/mm . Тя зависи от разстоянието и ускоряващото напрежение между фотокатода, МСР и екрана, както и от материала, използван за входните и изходни стъкла:

$$(1.10) \quad \delta \propto \frac{\sqrt{V}}{l}$$

където l – разстояние между фотокатода и екрана, V – приложено напрежение.

Граничната разделителна способност на ЕОП се определя като пространствена честота измерена в lp/mm , за която СТФ (*contrast-transfer-function*) е 3%. Тази разлика от 3% може да бъде забелязана от човешкото око (<http://www.proxivision>)

1.3.4. Квантова ефективност

Основна роля при формирането на този параметър играе светлинната чувствителност на фотокатода. Това е така, защото не всеки фотон, който попада върху фотокатода, формира електрон. Квантовата ефективност на фотокатода се движи в границите от 15 % до 30 % (Криксунов 1978). Съществува теоретична горна граница която зависи от използвания материал за производството на фотокатода. Всеки фотон, който не се е превърнал в електрон, намалява усилването на ЕОП и увеличава термичните шумове.

Квантовата ефективност Q може да се изчисли от спектралната чувствителност S , като (High Performance Image Intensifiers):

$$(1.11) \quad Q[\%] = S[mA/W] \frac{124}{\lambda[nm]}$$

1.3.5. Ореол

Ореолът се появява когато върху фотокатода попадне светлинен сигнал от достатъчно мощен точков източник. Върху екрана на ЕОП се наблюдава ярко светеща точка, която се намира в средата на светлинен кръг с ниска яркост. Причината за това е, че част от електроните се отклоняват от своето праволинейно движение към екрана (Zacher и др, 2007; Cui и др., 2013). Отклонените електрони предизвикват явлението ореол.

1.3.6. Време на живот на ЕОП и температурен диапазон

Времето на живот на ЕОП се определя от сумата на работните часове, при които фотокатодът е загубил 50 % от първоначалната си чувствителност, измерена със стандартен източник на светлинно излъчване тип А (2856 °K). Диапазонът на работните часове на съвременните ЕОП варира между 5000 и 15000 часа. Времето на живот на ЕОП (T_{EOI}) зависи от интензитета на постъпващата входна светлинна мощност и може да бъде изчислено чрез следната зависимост (High Performance Image Intensifiers):

$$(1.12) \quad T_{EOI} = \frac{C_{nl}}{SE}$$

където: T_{EOI} е време на живот на ЕОП в sec; S – чувствителност в A/lm ; E – осветеност в lx ; C_{nl} – плътност на зарядите във фотокатода в C/m^2 .

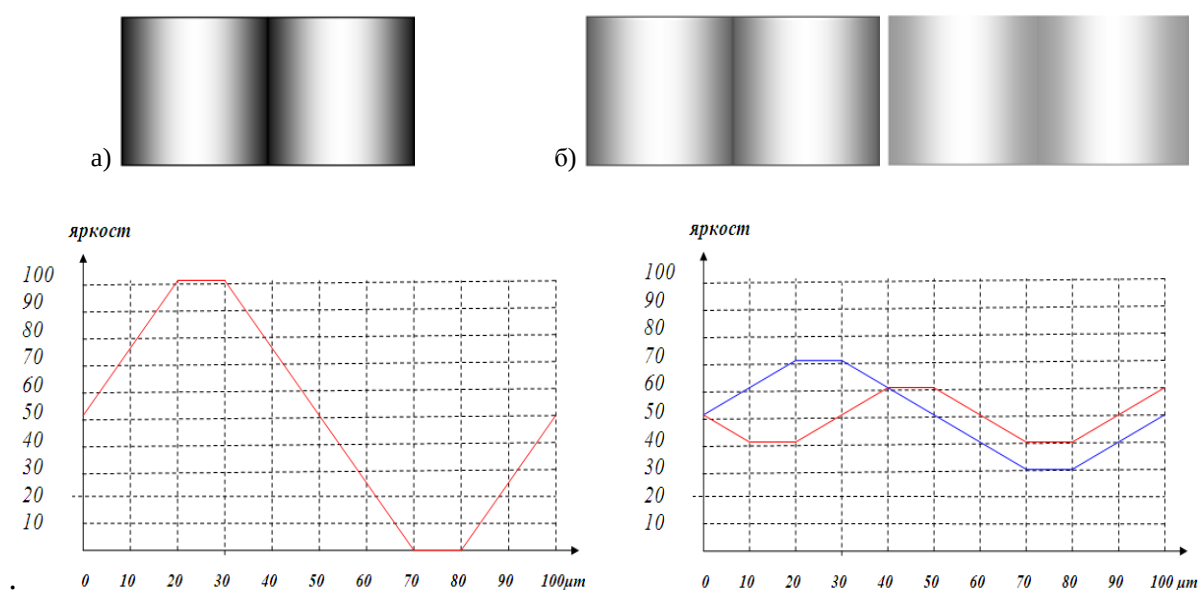
Съвременните ЕОП работят при температура от -45°C до $+55^{\circ}\text{C}$. В заводските спецификации обикновено присъства и температурният диапазон, в границите на който ЕОП може да бъде съхраняван на склад, без да бъде повреден.

1.3.7. Контраст

Контрастът се дефинира в термините на максимална яркост, минимална яркост и отношението между тях в проценти (DEP, 2004):

$$(1.13) \quad C = \frac{\text{макс.яркост} - \text{мин.яркост}}{\text{макс.яркост} + \text{мин.яркост}}$$

На Фиг. 1.16а е показан обект, който е с 100% контраст и притежава хоризонтален линейен размер от $100 \mu\text{m}$. Това означава, че неговата пространствена честота е равна на 10 lp/mm .



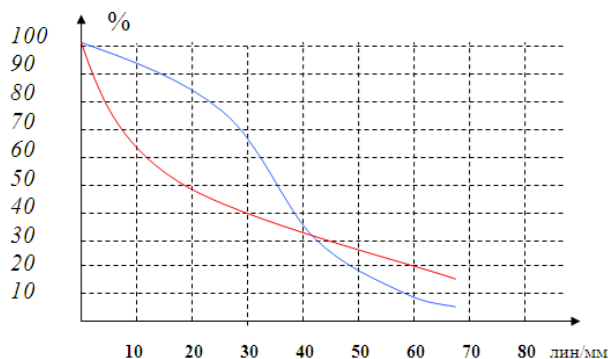
Фиг 1.16. Графики при различни контрасти: а) 100 %; б) 40 % и 20 %.

Червената линия показва, че обектът е съставен от една максимално ярка линия (бяла) и една тъмна линия, яркостта на която е равна на нула. Между тези две линии съществуват зони, които представляват плавен преход от максимална яркост до яркост равна на нула. На Фиг. 1.16б е показан в син цвят графичната зависимост на яркостта при линейни размери на обект с 40% контраст, а с червена линия – за обект с 20% контраст. Обектът притежава хоризонтален линейен размер равен на $100 \mu\text{m}$. Това означава, че неговата пространствена честота е равна на 10 lp/mm . Синята графика показва, че този обект е съставен от една линия, притежаваща относителна ниска яркост (светло сива линия), и една тъмна линия, яркостта на която е по висока от нула (тъмно сива линия.). Между тези две линии съществуват зони, които представляват плавен преход от светло сиво до тъмно сиво. Обектът притежава хоризонтален линейен размер равен на $60 \mu\text{m}$. Това означава че, неговата пространствена честота е равна на 16.5 lp/mm . Червената графика показва, че този обект е съставен от една линия, притежаваща относителна ниска яркост (светло сива линия и една тъмна линия, яркостта на която е по висока от нула (тъмно сива линия.). В този случай, разликите в

яркостите на вертикалните ивици е минимална (двете ивици „сивеят еднакво“). Между тези две линии съществуват зони, които представляват плавен преход между двете почти еднакви сиви ивици.

1.3.8. Модулационно-трансферна функция

Модулационно-трансферна функция (МТФ) е параметър на ЕОП, който е в състояние да предостави по-пълна информация, в сравнение с разделителната способност (Bender, и др., 2013). МТФ е комплексен функционален параметър, който показва контраста на изхода на изследваната система, когато на входа е приложена 100 % контрастна модулация (Rep и др., 2013). Тази зависимост на изходният контраст се представя като функция на приложената пространствена честота (Gul и Efe, 2010). Точните стойности на пространствената честота се задават с помощта на стандартни черно-бели оптични измерителни изображения, наречени „мири“ (Resolution test target). Геометричните размери на обектите определят пространствената честота. По-големите наблюдавани обекти, притежават ниска пространствена честота и техният контраст е висок. Малките обекти притежават висока пространствена честота и техният контраст е нисък. Може да се каже, че параметърът МТФ на ЕОП е аналог на параметъра *амплитудно-честотна характеристика (АЧХ)*, който се използва при мощните нискочестотни усилватели и определя техните качествени характеристики. Синята графика на Фиг. 1.17 определя висок контраст в областта до 20-30 lp/mm , което означава, че по-големите обекти ще се наблюдават по-добре.



Фиг 1.17. МТФ

Червената графика на Фиг. 1.17 показва по-висок контраст около 70 lp/mm , което означава, че малките обекти ще се наблюдават по-добре. По този начин става възможно окачествяването на конкретен ЕОП или уред, чрез неговата модулационно-трансферна функция.

1.3.9. Светлинен шум

Когато светлинният поток е с някаква пределно ниска мощност, върху екрана на ЕОП се наблюдават само сцинтилации (кратки присветвания върху екрана на ЕОП, които са разпределени хаотично върху цялото зрително поле). Наблюдателят остава с впечатление, че липсва полезна информация. В този случай е възможно да се използва CCD камера, чрез която се наблюдава екрана. Камерата работи в режим на натрупване

и запомняне, в резултат на което след известно време ще се появи полезна информация за образа.

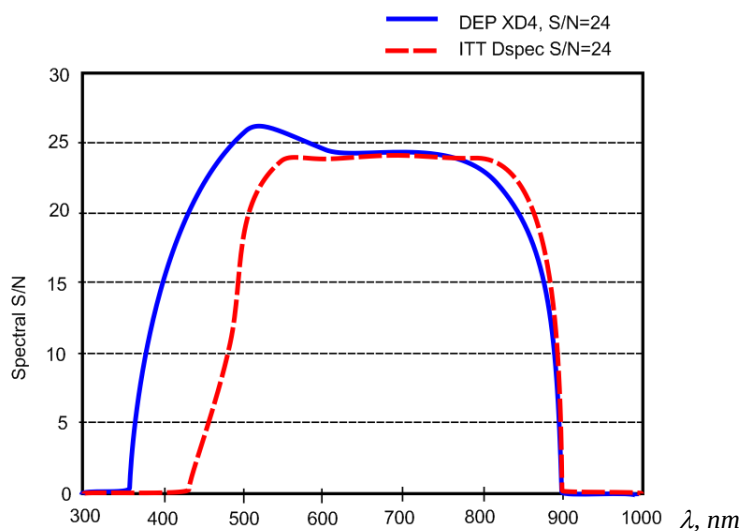
1.3.10. Отношение сигнал/шум

Отношението сигнал/шум (S/N) на ЕОП оказва влияние на възможността за разпознаване на светлинният образ в режим на ниски нива на осветеност и високи нива на светлинен шум (Chrzanowski, 2013; Bender и др., 2013). Отношението сигнал/шум се измерва в лабораторни условия при стайна температура чрез цифров спектрален анализатор. Отношението сигнал/шум на ЕОП може да се представи чрез следната математическа зависимост (XR-5TM Technology Image Intensifier):

$$(1.14) \quad \frac{S}{N} = \frac{S_0 - S_{bkg}}{\sqrt{N_0^2 - N_{bkg}^2}}$$

където: S – сигнал; N – шум; S_0 – постояннотоков сигнал на изхода на спектралния анализатор; S_{bkg} – постояннотоков сигнал на изхода на спектралния анализатор, съответстващ на тока на тъмно; N_0 – средноквадратично отклонение на шума на постояннотоковият сигнал; N_{bkg} – средноквадратично отклонение на шума, съответстващ на тока на тъмно.

От (1.14) е видно, че отношението на постоянно-токовата разлика между сигнал и ток на тъмно към дисперсията на шума представлява отношение сигнал/шум на ЕОП. Стойността на отношението сигнал/шум зависи от дължината на вълната и от конкретния ЕОП, както е показано на Фиг. 1.18 (DEP, 2004).



Фиг. 1.18. Спектрална зависимост на отношението сигнал/шум

В двата края на светлинният спектър отношението сигнал/шум става равно на нула. Максималната стойност е при дължина на вълната около 700 nm. Отношението сигнал/шум е възможно да бъде измерено и в реални условия при естествена нощна осветеност. Неговата стойност ще бъде различна, в зависимост от пейзажа и фона, който се намира зад наблюдавания обект. Причината е, че различният пейзаж отразява

по различен начин светлината. Пустини и водни крайбрежни повърхности отразяват в синьо-зеления спектър, докато планинско-равнините райони отразяват по-добре в червената спектрална област (Image Intensifiers, Photonis). Тези особености трябва да се вземат предвид при измерване на отношението сигнал/шум в реални условия.

Когато осветеността на фотокатода на ЕОП стане достатъчно ниска, започват да преобладават статистическите процеси, определящи се от отношението сигнал/шум (Коновалов, 2010). Шумовият фактор е параметър на ЕОП, който определя в каква степен се увеличават светлинните шумове, предизвикани от МКП и от тока на положително заредени йони, движещи се в обратна посока на електроните. Шумовият фактор е безразмерна величина, чиято стойност се движи в границите от 1.2 до 3.8, и може да бъде определен от следната зависимост (Bosch, 2000; Bosch & Boskma, 1994):

$$(1.15) \quad F = \frac{A_{ob} \cdot E \cdot S \cdot t_i}{Q \cdot (S / N)^2}$$

където: A_{ob} – площта на наблюдавания обект в m^2 ; E – входната осветеност $10^{-4} lx$; S – фотокатодната чувствителност в A/m ; t_i – период на измерване в sec ; Q – заряд на електрона ($1.6 \cdot 10^{-19} C$); (S/N) – отношение сигнал/шум.

1.3.11. Ток на тъмно. Еквивалентна фонова осветеност

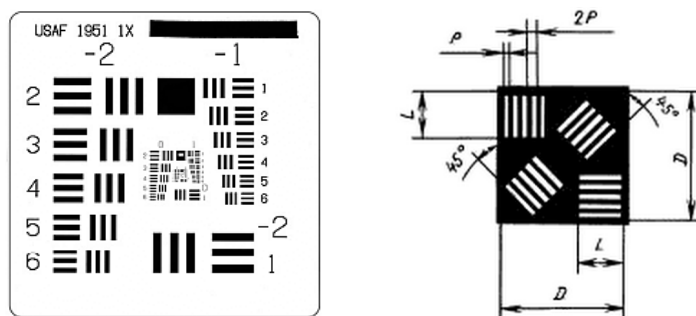
Токът на тъмно се предизвиква от различни причини и се появява по време на активен усилвателен режим на всеки съвременен ЕОП (Bender и др., 2013). Резултатът е светене на екрана, когато на фотокатода отсъства светлина. Токът на тъмно е комплексен параметър на ЕОП и се използва в изчисленията за да представи интегралното ниво на светлинния шум (Bender и др, 2004). Измерва се в лабораторни условия чрез използване на стандартен светлинен източник на светлинно излъчване клас А (2856 °K) и при околна температура 21 °C. Еквивалентна фонова осветеност (ЕФО) е мярка за тока тъмно и зависи от химическия състав на фотокатода (Image Intensifiers – SBS Holding).

1.4. Методи за определяне на характеристиките на УНВ

Съществуват няколко технически параметри на УНВ, които влияят на качеството на наблюдаваното изображение, описани в резюме по-долу (Koretsky и др, 2013).

1.4.1. Измерване на разделителна способност на УНВ

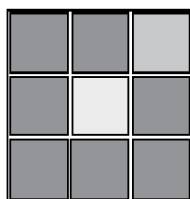
Един от важните параметри на УНВ е неговата разделителна способност, която трябва да се вземе предвид при сравняване качеството на различни УНВ (Daye & Young, 1998). Най-често използвания метод за определяне на разделителната способност на УНВ, използва специално разработени комбинации от обекти с периодична структура (мири). На Фиг.1.19 са показани две от най-използваните мири (Pinkus & Task, 1998, ГОСТ 15114-78).



Фиг. 1.19. Оптични мири: а) USAF 1951 б) сегмент от ГОСТ 15114-78

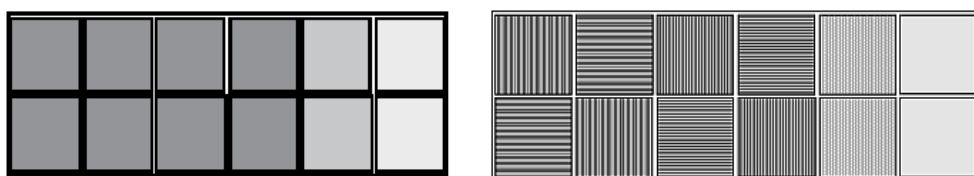
Този метод се е наложил като стандарт за тестване не само на оптоелектронните уреди, но и на оптични системи (3-Bar Resolving Power Test Chart). Определянето на разделителната способност на УНВ се извършва от трениран наблюдател, наблюдаващ мишата при специфична осветеност (Bai и др., 2013). Въпреки масовото му използване и доказаната му полезност, този метод не дава съвпадение на резултатите. Възможна е разлика в определянето на разделителната способност от различни наблюдатели до 60 % (Pinkus & Task, 1998).

Друг метод за определяне на разделителната способност на УНВ използва диаграма, съдържаща 3 x 3 квадратни полета (“3x3 NVG Chart”). Тази диаграма е разработена като средство за оптимална настройка на ОНВ, непосредствено преди боен полет (Фиг. 1.20) (Pinkus & Task, 1998).



Фиг. 1.20. Диаграма 3x3

Тази диаграма е стандартизирана за наблюдение от дистанция 6.096 m (20 фута). Всеки квадрат е оразмерен съответно на еквивалентните стойности на оптометричните таблици за измерване остротата на зрението (“Snellen Letter Charts”) от 20/20 до 20/60 единици за острота през 5 такива. Разположенията и ориентацията на квадратите в таблицата са случайни, което се постига чрез завъртането ѝ, и чрез изработване на няколко таблици с различни нива на контраст. Тази диаграма не е подходяща за сравняване възможностите на различни УНВ. Недостатък на този метод е сравнително голямата стъпка между деветте полета, което го прави неизползваем при сравняване възможностите на различни УНВ с близки разделителни способности. За отстраняване недостатъка на горния метод е разработен друг метод “стъпка-назад” (“Step-Back”) (Фиг. 1.21) (Pinkus & Task, 1998).

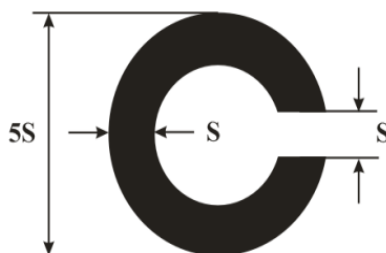


Фиг. 1.21. Диаграма “стъпка-назад”.

Диаграмата на този метод съдържа 6 двойки вертикално и хоризонтално ориентирани квадрати. Диаграмата се наблюдава през очила за нощно виждане (ОНВ) от дистанция 9.144 m (30 фута). За определяне на разделителната способност чрез този метод, измерванията се повтарят (обикновено 5 пъти) от трима тренирани наблюдатели и се взема средноаритметичната стойност като крайна стойност.

1.4.2. Осветеност

За да работят пасивните УНВ е необходима някаква минимална осветеност. Един от методите за нейното определяне използва диаграмата “Landolt C”, представляваща незатворена окръжност (Фиг. 1.22) (Pinkus & Task, 1998):

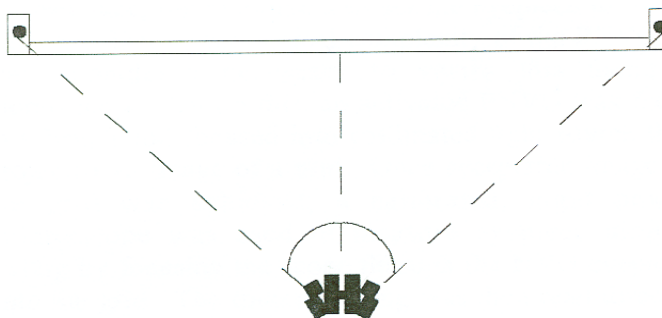


Фиг. 1.22 Диаграма при метода Landolt C

Наблюдателят трябва да открие ориентацията на отвора при различни нива на осветеност. Съществува разработена модификация, използваща компютърна програма, със стъпков алгоритъм за избор размера на отвора в зависимост от отговора на наблюдателя. Тази разновидност на метода позволява относително ефективно и точно определяне на разделителната способност, като сходимост към действителната разделителна способност се постига с определен брой опити. Въпреки задоволителните резултати, тестове с един и същ наблюдател в различни дни показват различни стойности на разделителната способност. Това се обяснява с факта, че се изследва праговото ниво на разделителна способност и незначителни промени в параметрите в УНВ, умора на наблюдателя и т.н., водят до разлики.

1.4.4. Зрително поле и диоптрийна настройка

В (Marasco & Task, 1999) е описана процедура за измерване на параметрите “зрително поле” и “диоптрийна настройка” на панорамни очила за нощно виждане (ПОНВ). Използвани са два метода за определяне на зрителното поле – тестване едновременно на двата опто-електронни канала и последователно тестване на всеки от тях (Фиг. 1.23). Този метод има за цел да определи зрителното поле на УНВ, който в случая на ПОНВ е 100 градуса. Методът е достатъчно точен и обективен, тъй като изисква от наблюдателя да определи дали вижда или не съответните гранични маркери. Определянето на увеличението, зрителното поле, отдалечеността и диаметърът на изходната зеница, диоптрийната настройка и попълното разстояние на произведените в България ОНВ “Прилеп” е описано в (Borissova & Dekov, 2002).

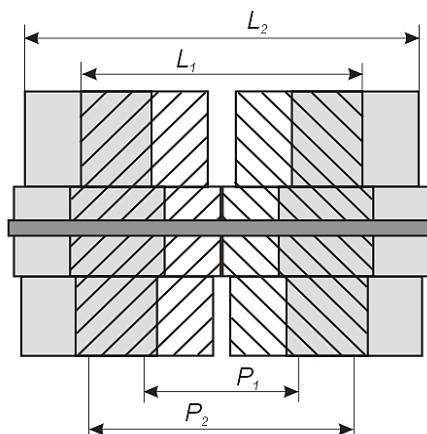


Фиг. 1.23. Зрителен ъгъл на ПОНВ

За определяне увеличението на ОНВ се използва специализирана установка, съдържаща колиматор, опто-електронен канал на ОНВ и диоптроскоп. Зрителното поле се определя по метода, описан в (Marasco & Task, 1999). За определянето на диоптрийната настройка са използвани диоптроскоп, оптоелектронен канал на изследваните ОНВ и светлинен източник, проектиращ образа на тест-обекта. Проверката се извършва за двата опто-електронни канала последователно.

1.4.3. Попилно разстояние

Параметърът попилно разстояние се отнася за УНВ с два независими опто-електронни канала. Диапазонът на попилното разстояние $P_2 - P_1$ се определя чрез измерване на разстоянията L_1 , L_2 (Фиг. 1.24.) при най-близко и най-далечно разположение на електронно-оптичните канали и вземане предвид на диаметъра на опто-електронния канал (Borissova & Dekov, 2002).



Фиг. 1.24. Попилно разстояние на УНВ

1.4.5. Методи за определяне на разстоянието на действие на УНВ

Определяне на разстоянието на действие на УНВ в реални условия е съпроводено с разходи на време и труд. Освен това, всяко тестване се осъществява при конкретни условия на осветеност, състояние на атмосферата и на фоновата обстановка и получените резултати са в сила само за тези условия. Това налага разработването на методи за теоретично или лабораторно определяне на разстоянието на действие на УНВ. В (Кривошапкин & Эдельштейн, 1998) е предложен метод, който се основава на намирането на регресивната зависимост за получаване на разстоянието

на действие на уреда, в зависимост от измерените в даден момент външни условия. Предполага се, че в определени граници тази зависимост може да има линеен вид. След намиране на коефициентите на регресията и въвеждане в уравнението на нормираните параметри на външните условия, може да се определи разстоянието на действие на уреда при тези условия. Чрез анализ на параметрите на елементите опто-електронния канал на ОНВ в (Кошавцев и др, 1999) е показано, че при ниски нива на осветеност увеличаването на разстоянието на действие на ОНВ е за сметка на подобряване на енергийните параметри на елементите на системата, а при високи нива на осветеност – за сметка на повишаване на разделителната способност. Друг метод и компютризирана система за определяне разстоянието на действие на УНВ в лабораторни условия е описана в (Григорьев и др, 2000). Ако се измери разделителната способност и шумовете на УНВ е възможно, чрез предложен статистически модел на наблюдателя, да се определи разстоянието на действие при зададени условия. Един от най-разпространените методи за теоретично определяне на разстоянието на действие е използването на *енергетичен разчет* (Разумовский, 2001; Тымкул, 1993; Тымкул, 2001). Чрез него е изведена формула, определяща разстоянието на действие като (Borissova и др, 2001):

$$(1.16) \quad R = \sqrt{\frac{A_{\text{вх}} A_{\text{об}} \tau_o \tau_a E K}{\pi \mu \Phi_{\text{пр.фк}}}} \text{ [m]}$$

където: $A_{\text{вх}}$ – площ на входящият отвор на оптичния уред в m^2 ; $A_{\text{об}}$ – площ на наблюдавания обект в m^2 ; τ_o – пропускане на оптиката; τ_a – пропускане на атмосферата; E – естествена нощна осветеност в lx ; K – коефициент на използване на светлинния поток от фотокатода; μ – необходимото минимално отношение сигнал/шум; $\Phi_{\text{пр.фк}}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm .

Формула (1.16) взема под внимание площта на наблюдавания обект, но не отчита разделителната способност на уреда, а спектралната чувствителност на фотокатода на ЕОП участва неявно чрез коефициента на използване на светлинния поток от фотокатода K .

В (Гоев, 2002) се предлага математически израз за определяне разстоянието на действие на ОНВ, като функция от параметрите на обектива – пропускане на оптичните елементи, диаметър на входната зеница, интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП, разделителната способност на уреда и външните условия на наблюдение – пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност и контраст между наблюдавания обект и фона:

$$(1.17) \quad R = 3.10^5 \sqrt{\frac{\tau_o \tau_a D_{\text{вх}} S E K}{\mu \gamma}} \text{ [m]}$$

където: $D_{\text{вх}}$ – диаметър на входната зеница на обектива в m ; τ_a – пропускане на атмосферата; τ_o – пропускане на оптичната система; S – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm ; E – естествена нощна осветеност в lx ; K – контраст; μ – отношение сигнал/шум; γ – разделителната способност в rad .

В тази формула участва разделителната способност на уреда и се отчита интегралната чувствителност на фотокатода на ЕОП. В този случай, при определяне на разстоянието на действие не се взема предвид площта на наблюдавания обект.

В резултат на анализа, извършен в (Малинин, 2003) е направен изводът, че разстоянието на действие на УНВ зависи от много величини, включително и от фокусното разстояние на обектива и от диаметъра на входния отвор на обектива. Обосновава се идеята, че при проектирането е необходимо да се подбере такова съотношение на параметрите, при което разстоянието на действие на УНВ да е оптимално спрямо зададени изисквания.

Друга формула за определяне разстоянието на действие на УНВ е предложена в (Елизаренко и др., 1981):

$$(1.18) \quad R = \sqrt{\frac{A_{\text{ex}} \tau_a I}{\mu \Phi_{\text{пр.фк}}}}$$

където: A_{ex} – площ на входящия светъл отвор на оптичната система; τ_a – коефициент на пропускане на атмосферата; I – интензитет на светлинното излъчване; μ – необходимо минимално отношение сигнал/шум, гарантиращо нормалната работа на уреда; $\Phi_{\text{пр.фк}}$ – прагова чувствителност на нощния уред.

Математическите изрази (1.17), и (1.18) са често използвани за практически нужди при проектиране на уреди за нощно виждане.

При решаване на задачата за определяне на разстоянието на действие на УНВ са възможни различни подходи. В някои случаи, математическият израз показва зависимостите при отсъствие на осветен фон зад наблюдавания обект (Тамкул, 1972):

$$(1.19) \quad R = \sqrt{\frac{I A_{\text{ex}} K_p}{\mu \Phi K(\Delta f) K_e}}$$

където: K_p – коефициент на използване на приемника с отчитане на затихването в атмосферата и оптичните детайли; $K(\Delta f)$ – коефициент, отчитащ изменението на честотата на модулацията, при еталонна честота; K_e – коефициент на използване на приемника по отношение на еталонен източник с отчитане на оптичното затихване.

В математическия израз (1.19) коефициенти K_p и K_e могат да бъдат определени чрез следните зависимости (Тамкул, 1972):

$$(1.20) \quad K_p = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \Phi_o(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) d\lambda \right) \left(\int_0^{\infty} \Phi_o(\lambda) d\lambda \right)^{-1}$$

$$(1.21) \quad K_e = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \right) \left(\int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \right)^{-1}$$

където: $S(\lambda)$ – относителна спектрална чувствителност на приемника; λ_1 – долна граница на дължина на светлинна вълна, определяща спектралната чувствителност на приемника; λ_2 – горна граница на дължина на вълна, определяща спектралната чувствителност на приемника; $\Phi_o(\lambda)$ – спектрален поток, излъчван от обекта; $\Phi_e(\lambda)$ – спектрален поток, излъчван от еталонен източник; $\tau_o(\lambda)$ – спектрален коефициент на

пропускане на оптичната система; $\tau_a(\lambda)$ – спектрален коефициент на пропускане на атмосферата.

Когато фонът зад наблюдаваният обект излъчва равномерно в цялото зрително поле на уреда може да се използва следният израз за определяне на разстоянието на действие (Изнар, 1972):

$$(1.22) \quad R = \sqrt{\frac{A_{ax} A_o (L_p K_p - L_\phi K_\phi)}{m \Phi K(\Phi_\phi) K(\Delta f) K}}$$

където: A_{ax} – площ на входящия светъл отвор на оптичната система; A_o – площ на проекцията на обекта в направление на обекта; L_p – излъчвана интегрална яркост на обекта; L_ϕ – излъчвана интегрална яркост на фона; K_ϕ – коефициент на използване на приемника по отношение на фона; $K(\Phi_\phi)$ – коефициент, показващ понижаването на чувствителността на приемника в резултат на шумови смущения, получени от фона.

Когато фонът зад наблюдавания обект излъчва неравномерно в цялото зрително поле, то може да се използва следната зависимост за определяне на разстоянието на действие (Изнар, 1972)

$$(1.23) \quad R = \sqrt{\frac{L_p A_o K_p}{m n L_\phi K_\phi \omega_{zp}}}$$

където: m и n определят дълбочина на модулация на светлинният поток, излъчен от фона и наблюдаваният обект; ω_{zp} – зрителен ъгъл на оптичната система.

От този израз се вижда, че разстоянието на действие при неравномерно излъчващ фон не зависи от големината на входящия отвор.

Разработена е методика за изчисляване на разстояние на действие на пасивен УНВ (Сухопаров и Пизюта, 1973; Сухопаров, 1974) чрез изчисляване на относителния контраст на полученото изображение. В тази методика са взети под внимание осветеността на обекта, осветеността на нощното небе, разсейването на атмосферата и направлението на излъчване на луната. Не са взети под внимание пространствено-честотните характеристики на обекта, деформациите в оптичната система и параметрите на ЕОП. Използвани са законите на геометричката оптика чрез два математически изрази. Първият се отнася до яркостта на изображението на обекта върху входящия отвор на уреда, вторият се отнася до яркостта на фона върху входящия отвор на уреда. Идеята на този енергетичен разчет е да се създаде възможност за изчисляване на относителния контраст на изображението. По този начин е възможно да се съди за разстоянието (Сухопаров и Пизюта 1973; Сухопаров, 1974). Изразът за яркост на входното изображение се представя като:

$$(1.24) \quad L_{o\Sigma} = \frac{k\eta_o \tau_o L_H d^2 \rho_o}{4f'^2 V^2} e^{-\beta_o l} + \frac{k\eta_o \tau_o L_H d^2}{4f'^2 V^2} \cdot (1 - e^{-\beta_o l}) + \\ + \frac{k\eta_o \tau_o E_L d^2 \rho_o}{4\pi f'^2 V^2} e^{-\beta_o l} \cdot \cos \alpha_L + \frac{k\eta_o j}{k_o \pi \Phi V^2}.$$

където: L_H – яркост на нощното небе; E_L – осветеност от луната; d – ефективен диаметър на входящия отвор на уредът за нощно виждане; f' – задно фокусно разстояние на обектива на УНВ; τ_o – интегрален коефициент на пропускане на

оптичната система; η_o – коефициент преобразуване на ЕОП; $V_{лин}$ – линейно увеличение характерно за ЕОП; k, k_o – коефициент използване на цялата оптична система; ρ_o – коефициент на отражение от повърхността на наблюдаваният обект; β_a – показател на затихване в атмосферата; l – разстояние до обекта; j – плътност на тока на термоелектронната емисия; φ – моментна интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП; α_l – ъгъл между нормалата към обекта и направлението към луната.

Яркостта на фона върху входният отвор на уреда се представя чрез:

$$(1.25) \quad L_{\Phi\Sigma} = \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2\rho_\phi}{4f'^2V^2} e^{-\beta_a l_\phi} + \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2}{4f'^2V^2} \cdot (1 - e^{-\beta_a l_\phi}) + \\ + \frac{k\eta_o\tau_oE_Ld^2\rho_\phi}{4\pi f'^2V^2} e^{-\beta_a l_\phi} \cdot \cos\alpha_{\phi l} + \frac{k\eta_o j}{k_o\pi\Phi V^2}.$$

където: ρ_ϕ – коефициент на отражение от повърхността на фона; l_ϕ – разстояние до фона; $\alpha_{\phi l}$ – ъгъл между нормалата към повърхността на фона и направлението към луната.

След като се определят яркостта на фона и яркостта на обекта е възможно да се намери относителния контраст чрез израза:

$$(1.26) \quad K = \frac{L_{o\Sigma} - L_{\phi\Sigma}}{L_{o\Sigma} + L_{\phi\Sigma}} = F(k, k_o, \eta, \tau_o, L_H, E_L, \rho_o, \rho_\phi, \beta_a, f', V, l, l_\phi, j, \varphi)$$

Известно е, че праговият контраст на обект, възприеман от човешкото око, е в границите от 0.02 до 0.03 lx, което позволява да се установи и разстоянието на действие (Сухопаров и Пизюта 1973; Сухопаров, 1974; Berezovsky и др, 2001)

Друг възможен подход за теоретично определяне на разстоянието на действие е предложен в (Borissova и Mustakero, 2006) чрез използване на параметрите на отделните елементи на опто-електронния канал и външните условия на наблюдение:

$$(1.27) \quad R = \sqrt{\frac{0,07D_{ex}f'_{об}\tau_o\tau_aS\delta_{ЕОП}EA_{об}K}{\mu\Phi_{пр.фк}}} [m]$$

където: D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m ; $f'_{об}$ – фокусно разстояние на обектива в mm ; τ_o – пропускане на обектива; τ_a – пропускане на атмосферата; $\Phi_{пр.фк}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm ; $\delta_{ЕОП}$ – разделителната способност на ЕОП в lp/mm ; S – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm ; μ – необходимо минимално отношение сигнал шум, гарантиращо нормалната работа на уреда; E – естествена нощна осветеност в lx ; K – контраст между наблюдавания обект и фона; $A_{об}$ – площ на наблюдавания обект в m^2 .

Всички представени до тук подходи определят разстоянието на действие на УНВ като функция на различни параметри, но не дават ясна информация за прякото влияние на температурата върху параметрите на УНВ. В (Musla и Jaiswal, 2007) е описано, че температурната зависимост на тока на тъмно и на параметъра ЕФО, имат значителен ефект върху разстоянието на действие на УНВ. Нивото на ЕФО определя нулевата разлика между обекти с ниска яркост и нивото на фоновото осветление (Cooke, 2005). При повишаване на температурата ЕФО се удвоява за всеки 3 - 4

градуса по Целзий (Travis, 1996). За съжаление не е представена конкретна аналитична зависимост, чрез която да може да се оцени промяната на разстоянието на действие на уреда, като резултат от промяната на температурата. Според (Разумовский, 2004), за да се промени с един порядък тока на тъмно, външната температура трябва да се покачи с 15°C за кислородно-сребърен фотокатод, с 25°C за мултиалкални фотокатоли и с 40°C за антимоно-цезиев фотокатод. Други автори дават сведения за експерименти, при които е установено, че топлинната емисия на електрони от фотокатода води до прекомерно високи стойности на еквивалентната фонова осветеност (Zhu и др, 2013).

Всичко това е достатъчно основание да бъде направено изследване на зависимостта на параметрите на УНВ (използващи електронно-оптични преобразуватели) от температурата на околната среда.

1.5. Цел на дисертационния труд

Цел на настоящия дисертационен труд е да се моделира и изследва влиянието на температурата на околната среда върху параметрите на УНВ и в частност, да се определи функционалната зависимост на разстоянието на действие на УНВ от температурата. За постигането на тази цел е необходимо да се изпълнят следните задачи:

1. Изследване и анализиране на съвременното състояние на уредите за нощно виждане с електронно-оптични преобразуватели по отношение влиянието на температурните промени върху основните параметри на уредите за нощно виждане.
2. Определяне на функционална зависимост на параметрите на уредите за нощно виждане с електронно-оптични преобразуватели от температурата на околната среда.
3. Разработване на методология за определяне на външните условия на наблюдение (вкл. околната температура), при които се запазва разстоянието на действие, зададено в каталожните спецификации на уредите за нощно виждане.
4. Разработване на алгоритъм за проектиране на УНВ, позволяващ предварителна оценка на параметрите на проектираните уреди и вземащ предвид външните условия на наблюдение, в т.ч. и температурата на околната среда.

ГЛАВА 2.

ОБОБЩЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАЗСТОЯНИЕТО НА ДЕЙСТВИЕ НА УНВ С ОТЧИТАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА

Използването на метода на енергетичния разчет води до различни математически изрази, чрез които е възможно изчисляването разстоянието на действие на уредите за нощно виждане, но в тях не присъства в явен вид температурата на околната среда, при която се извършва наблюдението. Това влияние може да се определи като се извърши анализ на *тока на тъмно* на ЕОП. Токът на тъмно е комплексен параметър на ЕОП, който се използва за изчисляване на интегралното ниво на светлинните шумове, използвани за определяне на праговите възможности на нощния уред. За да се отчете влиянието на температурата върху разстоянието на действие, в настоящия дисертационен труд е въведен температурно зависим коефициент. На базата на анализа на физическите взаимодействия в ЕОП е установена връзката между параметрите на ЕОП и температурните промени. Използвайки основното уравнение на енергетичния разчет за нормална работа на УНВ е изведена математическа зависимост за влияние на температурата върху разстоянието на действие на УНВ. Използването на въведения температурно зависим коефициент позволява да бъдат модифицирани известни формули за определяне разстоянието на действие като се отчита и влиянието на температурата на околната среда. Така предложената математическа зависимост е използвана в разработена методология за определяне на възможни комбинации от външни условия на наблюдение, при което разстоянието на действието на уреда, съответстващо на зададеното разстояние в техническите спецификации на уреда. Методологията за определяне на различни комбинации от външни условия на наблюдение се базира на формулирането на съответни математически задачи. Описан е и предложени иновативен подход за определяне на предварителна теоретична оценка на проектираните УНВ като се вземат предвид параметрите на основните модули на УНВ, отчитайки конкретни външни условия на наблюдение, включително и температурата на околната среда. Описан е математически модел, който е интегриран в подходящ алгоритъм за предварителна теоретична оценка на параметрите на симулираните УНВ. Разработеният алгоритъм за проектиране на различни типове УНВ, взема предвид зависимостите между отделните модули, спецификата на различните типове УНВ, и също така отразява основните изисквания на потребителя към проектираното устройство.

2.1. Влияние на температурата върху тока на тъмно

Повишаването на температурата на околната среда води след себе си неизбежното повишаване на температурата на целият уред. Механичните и оптичните детайли на добре оразмерен уред, са устойчиви на такова въздействие и на практика не променят своите качествени характеристики. Най-уязвим в това отношение е ЕОП, при който се наблюдава явлението *ток на тъмно*. Същността на явлението се състои във факта, че в работно положение екрана на ЕОП свети, когато върху фотокатода отсъства светлина. Това специфично присветване (сцинтилации) е типичен пример за светлинен шум. Когато на входа на ЕОП се подаде слаб светлинен сигнал, сцинтилациите се смесват със светлинния образ на наблюдавания обект. В резултат от това смесване, слабият светлинен образ на обекта става неразличим. Стандартният параметър за представяне на това явление се нарича *еквивалентна фонова осветеност* (ЕФО) (Military Standard, MIL-STD-1858). Това е мярка за големината на смущенията, които се появяват върху светлинния образ. Тези смущения се генерират от компонентите на електронно-оптичния преобразувател в процеса на неговата работа, като усилвател на слаби светлинни сигнали. При повишаване на температурата се увеличава токът на тъмно, което води до намаляване на (ЕФО) (Seitz & Theuwissen, 2011). Експериментално е установено, че при различни температури на околната среда, промените на (ЕФО) пряко зависят от промените на тока на тъмно (Datta и др, 1984).

Еквивалентната фонова осветеност показва количеството на електроните, които са се появили в електронно-оптичния преобразувател и са достигнали до екрана, където са причина за появата на сцинтилации. Тези електрони не са се появили в резултат на въздействието на светлинен сигнал върху фотокатода и не представляват част от електронния образ, който се формира в електронно-оптичния преобразувател и следователно те не носят полезна информация за наблюдавания обект.

В заводските спецификации, придружаващи ЕОП, винаги присъстват индивидуалните протоколи от лабораторни измервания на всеки отделен ЕОП. В тези документи се посочват резултатите от измерената стойност на еквивалентната фонова осветеност. Това се отнася за производителите на ЕОП, които имат претенции за високо качество на своята продукция и устойчиво присъствие на пазара. Стойността на параметъра еквивалентната фонова осветеност се определя в лабораторни условия при стандартна стайна от температура 21 градуса по Целзий (MIL-STD-1858). Най-големият производител на европейския пазар „Фотонис DEP” измерва еквивалентната фонова яркост на електронно-оптичния преобразувател в съответствие с предварително разработена методика и програма (Image Intensifiers, Photonis).

2.1.1. Методи за измерване на еквивалентната фонова осветеност

Електронно-оптичният преобразувател се свързва галванично към определени електрически потенциали, които са необходими за неговата нормална работа и които отговарят на заводските спецификации на изследвания ЕОП. Точните стойности на необходимите потенциали са много важни, защото те оказват силно влияние върху големината на ЕФО. Процедурата за измерване на еквивалентната фонова яркост е следната: След включване на източника на електрически потенциал започва да тече стабилизиращ период, който има продължителност 15 минути. По време на стабилизиращия период, ЕОП се намира в лабораторни условия, при стайна температура и пълно отсъствие на светлина. След приключване на стабилизиращия период, с помощта на фотоелектронен умножител и фотометър се измерва яркостта на светене на екрана на електронно-оптичният преобразувател. Измерването се извършва в условията на пълно отсъствие на светлина. Показанията на фотометъра се записват като резултат R_1 . Полученият по този начин резултат притежава дименсия cd/m^2 , което е светлинна яркост на единица излъчваща повърхност. На следващият етап от измерването, на входа на електронно-оптичния преобразувател се подава светлинен сигнал с големина между $2 \cdot 10^{-11}$ и $7 \cdot 10^{-11}$ лумена на квадратен сантиметър. Светлинното петно е с форма на кръг и диаметър, съвпадащ с диаметъра на фотокатода на електронно-оптичния преобразувател. Светлинната енергия попада равномерно разпределена върху ефективния полезен диаметър на фотокатода. С помощта на фотометър се измерва светлинната яркост на екрана. Показанията на фотометъра се записват като резултат R_2 . Полученият по този начин резултат, също притежава дименсия cd/m^2 . Входният обектив на фотометъра трябва да бъде разположен по такъв начин, че входящият зрителният ъгъл на обектива да обхваща приемна площ от екрана с формата на кръг и с диаметър от 16 mm до 17 mm. С помощта на получените два резултата се определя параметъра еквивалентна фонова осветеност по следната формула (Image Intensifiers, Photonis):

$$(2.1) \quad EFO = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \quad [cd/m^2]$$

където: EFO – еквивалентна фонова осветеност; R_1 – яркост на екрана при отсъствие на светлина върху фотокатода; R_2 – яркост на екрана при осветеност на фотокатода между $2 \cdot 10^{-11}$ и $7 \cdot 10^{-11}$ лумена на квадратен сантиметър.

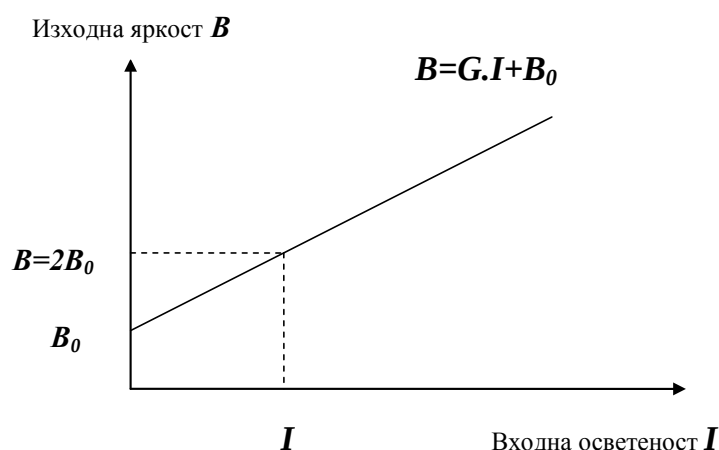
Европейският производител „Фотонис DEP” предлага още един алтернативен метод за измерване на еквивалентната фонова яркост, който е описан в методика и програма за изпитание на електронно-оптичният преобразувател SR5 (Image Intensifiers, Photonis). ЕОП се свързва галванично към точно определени електрически потенциали, отговарящи на заводските спецификации на конкретния електронно-оптичен преобразувател. Точните стойности на необходимите потенциали са много

важни защото техните стойности оказват силно влияние върху големината на параметъра ЕФО. След включване на електрическото захранване започва да тече стабилизиращ период, който има продължителност не по-малка от една минута и не по-голяма от петнадесет минути. По време на стабилизиращия период, ЕОП се намира в лабораторни условия, при стайна температура и пълно отсъствие на светлина. След приключване на стабилизиращия период, с помощта на фотоелектронен умножител и фотометър се измерва яркостта на светене на екрана на електронно-оптичният преобразувател. Измерването се извършва в условията на пълно отсъствие на осветеност на фотокатода. Полученият по този начин резултат се разделя на коефициента на усилване на ЕОП. В този случай се използва средната стойност на коефициента на усилване (G), който винаги присъства в спецификациите на висококачествените електронно-оптични преобразуватели. Числената стойност на частното, представлява еквивалентната фонова осветеност, и притежава дименсия cd/m^2 , което е светлинна яркост на единица излъчваща повърхност екрана на ЕОП (Image Intensifiers, Photonis):

$$(2.2) \quad EFO = \frac{R_1}{G}$$

където: EFO – еквивалентна фонова осветеност; R_1 – светлинна яркост на излъчваща повърхност; G – средната стойност на коефициента на усилване на ЕОП.

Европейският производител на висококачествени ЕОП „PROXITRONIC Detector Systems GmbH” представя параметъра ЕФО чрез входната осветеност на ЕОП, при която изходната яркост на екрана става два пъти по-голяма от яркостта, предизвикана от тока на тъмно, както е показано на Фиг. 2.1 (High Performance Image Intensifiers, 2011):



Фиг. 2.1 Еквивалентна изходна осветеност

Математическият израз, чрез който се определя еквивалентната фонова осветеност, показва функционалната връзка между входната осветеност, усилването

на електронно-оптичния преобразувател и яркостта на светене на екрана при пълно отсъствие на светлина върху фотокатода. Зависимостта на яркостта на тока на тъмно и усиляването на ЕОП може да се представи чрез израза:

$$(2.3) \quad B = G.I + B_0$$

При което е спазено условието:

$$(2.4) \quad G.I = B_0$$

Вземайки предвид (2.3) и (2.4) може да се определи:

$$(2.5) \quad B = 2B_0$$

където: B – еквивалентна фонова осветеност на тъмно на ЕОП; I – осветеност на фотокатода на ЕОП; G – усиляването на ЕОП; B_0 – осветеност на тъмно на ЕОП, при пълно отсъствие на осветеност на фотокатода.

При производството на ЕОП се спазват изискванията на стандартите, които посочват допустимите стойности на еквивалентната осветеност на тъмно. Като пример може да бъде посочено, че еквивалентната осветеност на тъмно за съвременните ЕОП има стойност около $0.2 \mu lx$. Тази стойност се отнася за ЕОП, които са второ поколение и притежават мулти-алкален фотокатод, а спектралната характеристика на интегралната чувствителност се намира в интервала от $300 nm$ до $900 nm$.

ЕОП от трето поколение с твърдотелен фотокатод от галиев арсенид имат осветеност на тъмно, която е съизмерима с осветеността на тъмно на ЕОП второ поколение.

Експериментите показват, че с повишаване на температурата стойността на ЕФО нараства експоненциално, като почти се удвоява на всеки 3 - 5 градуса покачване на температурата. Това означава, че ЕОП може да има стойност на еквивалентната фонова осветеност около 10^{-11} при $21^\circ C$, но когато температурата се увеличи до $35-40^\circ C$, стойността на ЕФО може да надхвърли $10^{-9} lm/m^2$ (Image Intensifiers Hamamatsu 2001).

Известно е, че фотокатодът на ЕОП е чувствителен към температурните промени. Параметърът еквивалентната фонова осветеност може да бъде използван като мярка, показваща количеството на електроните, които са се появили от фотокатода в резултат на въздействието на топлината при отсъствие на полезен светлинен сигнал от светлинен образ.

2.1.2. Причини за явлението “ток на тъмно” и на еквивалентната фонова осветеност

Причините за явлението ток на тъмно са различни и зависят от поколението на ЕОП, от технологичното ниво на производителя, от използвания фотокатод и от целите за които е произведен конкретния електронно-оптичен преобразувател. В

резултат на теоретичен анализ и експериментални изследвания в настоящия дисертационен труд се предлага основните елементи, които допринасят за големината на тока на тъмно (респективно за еквивалентната фоновая осветеност), могат да се разделят на три основни групи. Разделянето на групи е условно и е в зависимост от начина, по който се осъществява влиянието на конкретният фактор върху тока на тъмно.

В първата група попада явления, които имат фундаментална физическа природа – топлинна електронна емисия на фотокатода на ЕОП и вторична електронна емисия на микроканалната пластина. Във втора група попадат фактори, които имат механично-оптичен характер – оптична обратна връзка през стъкления корпус на ЕОП, оптична обратна връзка от екрана през микроканалната пластина до фотокатода и наличието или отсъствието на междинен алуминиев филм между микроканалната пластина и фотокатода (отнася се за трето поколение ЕОП). В третата група се намират специфични електрически параметри на ЕОП и технологични особености на конструкцията на високоволтовия преобразувател на електрически потенциал - обратен йонен ток от изхода на микроканалната пластина към входа на микроканалната пластина, потенциал между фотокатода и входа на микроканалната пластина, локални магнитни полета и електростатични полета.

1. Топлинна електронна емисия на фотокатода на ЕОП

Това явление бъде подробно разгледано, поради неговата тясна връзка с основните задачи на дисертационния труд. Отделителната работа, която се извършва при отделянето на електрон от повърхностния слой на фотокатода зависи от типа на фотокатода и от поколението на ЕОП. Има значение и спектралната чувствителност на ЕОП. Например, в общия случай токът на тъмно на ЕОП, работещ в близката ултравиолетовата област на спектъра, която е невидима за невъоръжено човешко око, е по-малък от тока на тъмно на ЕОП, работещ във видимата и близката инфрачервена област на спектъра.

Появяването на свободен електрон на някакво разстояние от повърхността на фотокатода, в резултат на топлинно движение, е фундаментално физическо явление и притежава случайно статистически характер. Обяснява се с законите на квантовата механика и се описва се с вълновото уравнение на Шрьодингер (Петров и Петров, 1989):

$$(2.6) \quad \frac{d^2\Psi}{dx^2} + \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right) \cdot [E - V(x)]\Psi = 0$$

където: Ψ – функция на Шрьодингер; m – маса на електрона; x – разстояние между електрона и ядрото на атома; $\hbar$ – константа на фината структура ($\hbar = h/\pi$, h – константа на Планк); E – пълната енергия на електрона; $V(x)$ – потенциалната енергия на електрона.

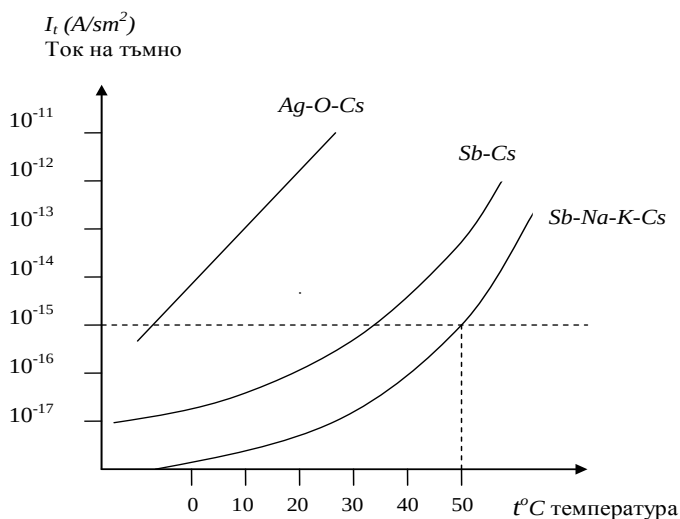
Съвременните интерпретации на квантовата механика показват, че квадрата от модула на функцията на Шрьодингер (Ψ), представя вероятността за появяването на термоелектрон (Райчева, 1989). Къде в пространството и кога във времето ще се случи това явление, по принцип не може да бъде предсказано с безкрайно голяма точност (Айнщайн, 1967). Мястото и времето на възникването имат вероятностно статистически характер и според вълновата квантова механика на Шрьодингер, могат да бъдат определени с точност не по-голяма от константата на Планк (Айнщайновский сборник, 1990).

На практика не съществуват технологични методи и средства, чрез които да се премахне термо-емисията на електрони, които са основната причина за явлението ток на тъмно. Единственият ефективен физически начин да се намали топлинното движение на електроните, е като се понижи температурата на фотокатода. При намаляване на температурата, токът на тъмно на всички фотокатоде намалява по определен начин, в съответствие с фундаментален физически закон, който се изразява чрез следната математическа зависимост (Зайдел и Куренков, 1970):

$$(2.7) \quad I_T = S \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{\sigma \cdot A}{k \cdot T}}$$

където: I_T – ток на тъмно; S – площ на фотокатода; A – технологична константа на фотокатода; T – температура в градуси Келвин; e – неперово число; k – константа на Болцман; σ – отделителна работа на фотокатода.

В зависимост от типа на фотокатода и от технологията, по която е изработен, токът на тъмно при една и съща температура за различните фотокатоде е различен (Разумовский, 2001). Независимо от тази количествена разлика, в качествено отношение всички фотокатоде увеличават тока на тъмно заедно с увеличаване на температурата, при което характерът на това увеличение се запазва. Зависимостта е силно нелинейна, както е показано на Фиг. 2.2 (Разумовский, 2001)



Фиг. 2.2. Зависимост ток на тъмно от температурата

Изключение правят някои фотокатооди, при изработката на които се използват метали и метални окиси от пети период на таблицата на Менделеев (AgO-O-Cs), както е показано на Фиг. 2.2. При тях зависимостта на тока на тъмно от температурата е линейна и това явление се използва за изработка на сензори, които се вграждат в измерителна апаратура.

От формулата и от графиката става ясно, че зависимостта между температурата и тока на тъмно е експоненциална. Това означава, че при достатъчно ниски температури, клонящи към абсолютната нула, за някои фотокатооди токът на тъмно също става равен на нула. В този случай, стойността на праговата чувствителност на уреда намалява и възможностите на нощният уред за разпознаване на светлинни образи при ниски нива на осветеност, нарастват многократно. Този ефект се използва при водене на наблюдение от космоса например.

При конструктивното оразмеряване на нощни уреди се взема под внимание фактът, че по абсолютни стойности термотока на различните фотокатооди варира в широки граници и се различава с няколко порядъка. Например, при една и съща температура, мултиалкалният фотокатод, направен от антимон, калий, натрий и цезий притежава ток на тъмно (I_m), от 10^{-16} A/cm^2 , до 10^{-17} A/cm^2 , докато кислородно-сребърно-цезиев фотокатод притежава ток на тъмно от порядъка на 10^{-11} A/cm^2 , до 10^{-12} A/cm^2 (Разумовский, 2001). Този факт не позволява използването на такъв фотокатод в пасивни уреди за нощно виждане. Панхроматичният фотокатод, съставен от бисмут, цезий и сребърен окис, притежава изключително равномерна спектрална характеристика, която съвпада със спектралната характеристика на човешкото око, но при стайна температура токът на тъмно е $10^{-8} \text{ (A/cm}^2\text{)}$ (Разумовский, 2001). Това е неприемливо висока стойност, която го прави негоден за използване при ниски нива на осветеност и в уреди за нощно виждане, които работят в условията на естествена нощна осветеност и повишена околна температура. Токът на тъмно на ЕОП от трето поколение с фотокатод от галиев арсенид е съизмерим или незначително по-голям от тока на тъмно на ЕОП от второ поколение.

Общата закономерност е, че с покачването на температурата все повече електрони напускат повърхностният слой и се насочват директно към екрана, когато електронно-оптичният преобразувател е първо поколение, или към входа на микроканалната пластина, когато електронно-оптичният преобразувател е второ или трето поколение.

Според (Разумовский, 2004), за да се промени с един порядък тока на тъмно, външната температура трябва да се покачи с 15°C за кислородно-сребърен фотокатод, с 25°C за мултиалкални фотокатооди и с 40°C за антимон-цезиев фотокатод. Експериментално е установено, че топлинната емисия на електрони от фотокатода води до прекомерно високи стойности на еквивалентната фонова осветеност (Zhu и др, 2013).

2. Вторична електронна емисия на МКП

Микроканалната пластина на съвременните ЕОП представлява паралелен аналогов усилвател на фокусиран електронен образ, работещ в реално време. Усилването е линейно в широки граници и динамичният диапазон достига до 10^6 . Това число показва отношението между най-слабия и най-силния фототок, които може да бъде усилен от микроканалната пластина без изкривявания. При тези ниски стойности на фототока е забелязано, че микроканалната пластина внася допълнителни електронни шумове, които се наслаждат върху полезния сигнал (Cheng и др, 2013). Параметърът, който представя количествената страна на това явление се нарича *шумов фактор* и може да бъде представен като (Нупесек, 2001):

$$(2.8) \quad F^2 = \frac{\sigma_{out}^2}{M^2 \cdot \sigma_{in}^2}$$

където: σ_{out} – стандартно отклонение (девиация) на количеството електрони, причиняващи шум на изхода на микроканалната пластина; σ_{in} – стандартно отклонение (девиация) на количеството електрони, причиняващи шум на входа на микроканалната пластина; M – усилване на микроканалната пластина (средна стойност посочена в техническите спецификации).

Шумовият фактор е различен за различните електронно-оптични преобразуватели. Той зависи от типа на ЕОП и се движи в границите от 1.5 до 3.3. Шумовият фактор е безразмерна величина, която показва колко пъти се е увеличило количеството на електроните, които причиняват светлинен шум и които са се появили на изхода на микроканалната пластина. Например, шумовият фактор на ЕОП от второ поколение се движи в границите от 1.6 до 2.2 пъти. За ЕОП от трето поколение, които притежават тънък алуминиев филм фабрично вграден между фотокатода и входа на микроканалната пластина, шумовият фактор се движи в границите от 2 до 3.5 пъти (Robbins и Hadwe, 2003).

Микроканалната пластина е линеен усилвател на електронен образ, което означава, че всичко което постъпи на входа, се усилва по един и същ начин, определен от коефициента на усилване. В този смисъл, микроканалната пластина е елемент, който не е в състояние да направи интелигентен избор чрез сравняване на шума и на полезния сигнал. Физическата същност и устройството на микроканалната пластина е такова, че тя не е в състояние да различи полезния сигнал от шума, който е насложен върху него. Това се отнася и за електроните, които са се отделили от фотокатода в резултат на повишаване на температурата. Тези електрони са се присъединили към полезния сигнал. Повишаването или намаляването на коефициента на усилване на МКП, с цел постига на по-ясен образ, не води до успех. Светлинният образ, получен на екрана ще бъде с по-голяма или по-малка яркост, но и в двата случая, еднакво

неясен. В крайна сметка, МКП допълнително повишава шума с коефициент, равен на стойността на шумовият фактор.

3. Оптична обратна връзка през стъкленият корпус на ЕОП

Когато екрана на ЕОП работи в активен режим, част от светлината, която се излъчва, се отклонява към стъклените стени на ЕОП. Те се превръщат в световод и отвеждат светлинната от екрана до фотокатода. Тази вредна паразитна светлина също предизвиква фотоефект и се появяват електрони, които не са носители на полезна информация. Създава се положителна оптична обратна връзка, която повишава светлинният шум. Този нежелан ефект се избягва като корпусите на съвременните електронно-оптични преобразуватели се произвеждат от материали, които са оптично-плътни и не пропускат светлина.

4. Оптична обратна връзка от екрана през МКП до фотокатода

Микроканалната пластина е оптически прозрачна и част от светлината на екрана достига до фотокатода. Това са нежелани вредни допълнителни обратни връзки, които увеличават тока на тъмно. За да се избегне този нежелан ефект, екранът се покрива със слой от тънък алуминиев филм (Jiang и др, 2010; Jiang и др, 2004). Слой се намира от вътрешната страна на екрана, между екрана и микроканалната пластина. Дебелината на слоя е такава, че електроните които се движат от изхода на микроканалната пластина към екрана преминават през него без загуба на кинетична енергия. По този начин, алуминиевият слой служи като предпазен отражател на светлината, която се насочва обратно към фотокатода. В същото време алуминиевият слой повишава механичната здравина на екрана и го предпазва от разрушаване, в резултат на ударите на електрони които са с висока кинетична енергия.

5. Алуминиев филм против обратен йонен ток

ЕОП от трето поколение включват в своята конструкция тънък алуминиев филм между фотокатода и входа на МКП. Основната функция на този филм е да спира положително заредени йони, които се появяват на входа на МКП (Song и др, 2013; Jiang и др, 2013; Timothy & Joseph, 2003). Под въздействието на електрическия потенциал, приложен между фотокатода и входа на микроканалната пластина, йоните се движат към фотокатода като непрекъснато увеличават своята скорост. Получават значителна кинетична енергия защото притежават маса, превишаваща масата на електрона стотици и хиляди пъти. Кинетичната им енергия е право пропорционална на масата:

$$(2.9) \quad E_k = \frac{m.V^2}{2}$$

където: E_k – кинетична енергия; m – маса на положително заредения йон; V – скорост.

Тези йони се удрят върху повърхността на фотокатода и увеличават кинетичната енергия на електроните, които напускат повърхността на фотокатода и по този начин нараства количеството на термичните електрони. Когато йоните се удрят върху фотокатода, съществува реална опасност той да бъде повреден механично. Причината е, че фотокатодът на електронно-оптичните преобразуватели трето поколение е изграден от микрокристали на галиев арсенид (затова се нарича твърдотелен фотокатод), които са чувствителни на механични въздействия. Между фотокатода и МКП се поставя тънък алуминиев филм, който притежава подходящ електрически потенциал. Конструкцията е такава, че слой от алуминий е прозрачен за електроните които се движат към микроканалната пластина, но улавя положително заредените йони и неутрализира техният заряд. Когато този филм отсъства, ЕОП от трето поколение имат по-голям термичен ток на тъмно, в сравнение с ЕОП от второ поколение.

6. Обратен йонен ток от изхода на МКП към входа на МКП

МКП притежава обратен йонен ток, който е в състояние да повиши шумовете в целият ЕОП. Положително заредени йони и цели твърди електрически заредени частици се движат от изхода на микроканалната пластина към входа на микроканалната пластина, под въздействието на приложеният електрически потенциал. Това движение се осъществява в микроканала и е насочено срещу движението на електроните, породени от вторичната електронна емисия. Тези йони не трябва да напускат микроканалната пластина. Поради това МКП се правят с наклонени или извити микроканални, които силно ограничават обратният, положителен йонен ток.

7. Електрически потенциал между фотокатода и входа на МКП

За правилната работа на съвременните ЕОП второ поколение, е необходимо, между фотокатода и входа на МКП да бъде приложен електрически потенциал, равен на 180 - 200 волта, като фотокатодът е отрицателния полюс, а входът на МКП е положителния полюс. Създава се електростатично поле, което да насочва отделените от фотокатода електрони към входа на МКП. Това се отнася и за термо-електроните, които винаги присъстват на повърхността на фотокатода. С повишаване на потенциала расте термо-токът и обратно. Ето защо точната стойност на това напрежение се определя в изследователските лаборатории на производителите. Няма достъпни литературни данни за начините на настройки и методите за определяне на тези параметри. В съвременните ЕОП захранващото напрежение между фотокатода и входа на микроканалната пластина е пулсиращо. Това позволява да се създадат уреди, които да могат да работят в дневно-нощен режим. Идеята е, че се съхранява фотокатода и се предпазва от повреждане, когато върху него попаднат мощни светлинни потоци. Чрез

променяне на размаха на това пулсиращо електрическо напрежение е възможно да се регулира и термо-тока на фотокатода. В някои случаи се прилага и нисък обратен потенциал на фотокатода, което означава че фотокатодът става положително зареден спрямо входа на МКП. Това става за кратко време и по този начин термоелектроните се връщат обратно върху фотокатода. Явлението е инертно и позволява да се поддържа в определени граници. Възможни са варианти, при които се променя и честотата и поляритета на захранващото напрежение. Целта е да се постигне минимален ток на тъмно, при запазване стойностите на интегралната чувствителност, квантовият добив и коефициента на усилване на ЕОП между фотокатода и входа на МКП. Възможно е и реализирането на активни отрицателни обратни връзки, които са част от интегрираният електронен преобразувател на напрежение и които имат за цел подобряване динамичните характеристики на ЕОП, включително и на термотока (Yin и др, 2013).

8. Локални магнитни полета

Локалните магнитни полета са в състояние да повишат термотока на фотокатода. Интегрираните високоволтови токозахранващи устройства преобразуват стандартно постоянно напрежение 2.7 - 3.5 волта във високоволтов потенциал от 6000 волта. Използват се малобабитни феритни трансформатори, които създават силни електромагнитни полета. Ако не са подходящо ориентирани спрямо корпуса на ЕОП и спрямо фотокатода са възможни изкривяване на образа и увеличаване на фототока. Поради това се предприемат конструктивни мерки за екраниране и за отвеждане на магнитните потоци в подходяща посока.

9. Електростатични полета

В електронно-оптичните преобразуватели е възможно да се появят силни локални електростатични полета, които са в състояние да увеличат значително емисиите на термо-електрони от фотокатода. Причината за появата на електрически статични полета е, че в интегрираното захранване се използват високоволтови изолационни компаунди и материали, които са склонни да натрупват върху своята повърхност неподвижни електрически заряди. По време на режим на активна работа, количеството на зарядите се увеличава и се създават електростатични полета, които могат да деформират образа и да увеличат термотока на фотокатода. Подходящият избор на изолационните материали и комбинациите на тяхното взаимно разположение е изключително сложна технологична задача, която изисква голям опит и винаги представлява ноу-хау за производителите на ЕОП.

2.1.3. Влияние на термичните промени на ЕФО върху параметрите на УНВ

От направия анализ се достига до извода, че различни фактори оказват влияние върху ЕФО, което от своя страна влияе върху техническите характеристики на електронно-оптичният преобразувател. Производителите на високо-качествени ЕОП са добре запознати с важната роля на параметъра ЕФО, определящ основните характеристики на целия уред. Когато става въпрос за най-високи изисквания към уредите за нощно виждане, задължително условие е спазването на военните стандарти. В такива случай големината на ЕФО не трябва да надвишава най-високата допустима стойност от 1.66×10^{-7} (Zhu, и др., 2013).

В направеното изложение бяха показани девет различни фактора, които са причина за явлението *ток на тъмно*. Осем от тях са свързани със технологичните възможности на производителите и са резултат от върховите постижения на съвременната наука – микроканална пластина, обратен йонен ток от входа на микроканалната пластина към фотокатода, потенциал между фотокатода и входа на микроканалната пластина, оптична обратна връзка през стъкления корпус на ЕОП, оптична обратна връзка от екрана през микроканалната пластина до фотокатода, локални магнитни полета, електростатични полета, наличието или отсъствието на междинен алуминиев филм между фотокатода и микроканалната пластина.

Посочените фактори са в състояние да увеличат тока на тъмно на електронно-оптичният преобразувател, като увеличават термичната емисия на електрони от фотокатода.

С напредването на технологичното развитие, влиянието на посочените осем фактора може да бъде сведено до минимум или да изчезне напълно. Поради това, при определяне влиянието на температурата на околната среда върху параметрите на УНВ, тези осем фактора могат да бъдат пренебрегнати. Факторът, който оказва най-голямо влияние върху параметъра ток на тъмно (отчитан чраз еквивалентната фонова осветеност) е *спонтанната емисия на електрони от фотокатода, която е причинена от температурното движение на електроните в повърхностния слой на материала от който е направен фотокатода на ЕОП*. Термотокът от фотокатода, който е възникнал в резултат на топлинното движение на електрони, е фундаментално физическо явление, което не може да бъде изключено или пренебрегнато. В потвърждение на това твърдение са и резултати от експерименти, които показват, че топлинната емисия на електрони от фотокатода, е основната причина за значително увеличаване на стойността на еквивалентната фонова осветеност (Zhu и др, 2013).

Казано по друг начин, токът на тъмно, представен чрез еквивалентната фонова осветеност, е параметър на електронно-оптичният преобразувател, който се използва в изчисленията, за да се определи интегралното ниво на светлинният шум, което от своя страна позволява да се определят праговите възможности на целия уред (Bender и др,

2004). Колкото по-нисък е прагът на чувствителност на нощния уред, толкова по-високи качествени показатели ще бъдат реализирани при използването му. Това означава, че способността на светлочувствителният сензор фотокатод да различава слаби полезни светлинни образи е по-голяма. В този случай и разделителната способност на целия уред е по-голяма. Съвременните ЕОП притежават разделителна способност по-висока от 65 lp/mm , което определя в крайна сметка и по-голямо разстояние на действие.

Бе показано, че интегралното количество на шумовете е право пропорционално от температурата. С повишаване на температурата, токът на тъмно расте експоненциално, в резултат на което нивото на прагова чувствителност расте по същия начин. Разстоянието на действие е обратно пропорционално на праговата чувствителност и като краен резултат може да се предположи, че разстоянието на действие ще намалява при увеличение на температурата по аналогичен начин.

Този анализ показва, че когато се установи връзката между разстоянието на действие и температура и се представи тази връзка чрез математическа зависимост, тя ще отразява комплексното влияние на температурата върху всички най-важни параметри на уреда. Намирането на такава математическа зависимост е една от конкретните задачи на настоящото изследване.

2.2. Енергетичен разчет – същност, етапи, основно уравнение

При проектиране на системи, в които присъстват оптични и електронни елементи, е необходимо да се извършва тяхното предварително теоретично изчисляване и оразмеряване по подходящ начин. Тази фаза от проектирането на всеки конкретен наблюдателен уред, е известна в средите на специалистите като енергетичен разчет или енергийно оразмеряване и съгласуване на уреда. Тази специфична конструкторска дейност и обемът в който ще бъде извършена, е в тясна зависимост от уменията знанията и натрупаният опит на специалиста, който води разработката. Съществуват случаи, когато част от анализите и теоретичните изчисления могат да бъдат съкратени. Това обикновено се прави, когато се оразмеряват дневни наблюдателни уреди. Когато става въпрос за изчисляване параметрите на нощни наблюдателни уреди и постигане на предварително заложените технически изисквания, енергетичният разчет се извършва в пълен обем и много често повече от един път.

Основната същност на метода *енергетичен разчет* е да се съгласуват в енергийно отношение минималните прагови възможности на електронният канал (ток на тъмно и еквивалентната фоновая яркост) и използваните оптични елементи. В крайна сметка се получават стойности за полезния сигнал на входа, който се излъчва от наблюдаваният обект и стойности за минималният входен сигнал, при който уредът

ще работи нормално. По същество това са двата основни елемента които определят крайните показатели на целият уред.

Минималният входен сигнал или прагът на чувствителност на нощният уред зависи от количеството на шумовете, които реално присъстват в оптичен уред. При извършване на енергетичен разчет се взема под внимание факта, че светлинните шумове се делят на две групи, според начина по който се появяват в оптичната система. В първата група попадат смущения и шумове, предизвикани от околната среда, във втората група са включени шумовете, предизвикани от оптичната система и електронно-оптичният канал. И двата вида оказват влияние върху размера на входния отвор на оптичната система, необходимото светлинно усилване, необходимата минимална разделителна способност и във крайна сметка върху комплексния параметър *разстояние на действие* на уреда. Заключение е, че на входа на всеки нощен уред винаги постъпва полезен сигнал и заедно с него вреден шум, които заедно и едновременно въздействат по определен начин на фоточувствителният елемент на уреда. Определянето на количеството на това въздействие и начина на това въздействие представлява същността на енергетичният разчет.

При извършване на енергетичен разчет, съществуват няколко последователни етапа, които, без да са абсолютно задължителни, под една или друга форма, винаги присъстват при проектирането (Елизаренко, 1981).

- съставя се уравнение за излъчения светлинен поток, който попада във входящия отвор на системата. При разпространението на този светлинен поток се взема предвид средата, през която той преминава, включително и през оптичната система на уреда.
- изчислява се праговата чувствителност на уреда и неговата зависимост от външни и вътрешни фактори.
- изчислява се необходимия минимален светлинен поток, при който уредът работи.

Изпълнението на тези етапи изисква предварително натрупан практически опит и конкретни умения, придобити при конструиране на подобни системи. В крайна сметка, намирането на подходящо оптимално отношение между светлинния поток, постъпващ от обекта и минималния светлинен поток (прагов светлинен поток), определя добрата работа на уреда като цяло. По същество, изборът на това отношение между тези два потока (праговия и минималния) представлява избор на параметъра отношение сигнал/шум. Трябва да се отбележи изрично, че това е минималното отношение сигнал/шум, при което уредът работи. Ако отношението между полезния сигнал и шума стане по-малко от този необходим минимум, то уредът престава да работи и с него не е възможно да се извършва наблюдение (Коротаев, 2012). Това

отношение се отнася за целият уред и е нещо различно от отношението *сигнал/шум* (S/N), което присъства в спецификациите на ЕОП.

Основната енергетична зависимост, определяща минималното отношение сигнал/шум може да се представи по следният начин:

$$(2.10) \quad \mu \leq \frac{\Phi_{\text{вх}}}{\Phi_{\text{пр}}}$$

където: μ е необходимото минимално отношение сигнал/шум; $\Phi_{\text{вх}}$ е необходимият минимален входящ светлинен поток; $\Phi_{\text{праг}}$ е праговата чувствителност на уреда, което е минималният светлинен поток, който уредът може да различи входния сигнал като полезен сигнал.

Основното енергетично уравнение може да бъде представено като:

$$(2.11) \quad \Phi_{\text{вх}} \geq \mu \cdot \Phi_{\text{пр}}$$

Тока поученото уравнение се решава за някои от параметрите на уреда.

2.3. Определяне на зависимост между температурата и параметрите на УНВ

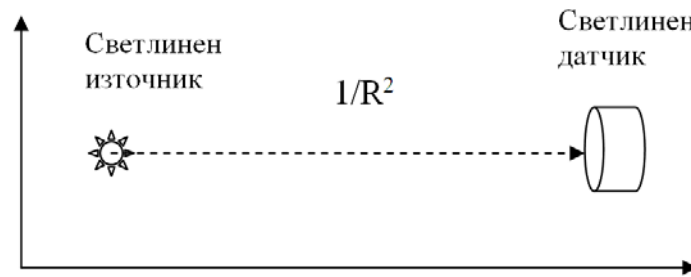
Най-чувствителен към температурни промени е фотокатода на електронно-оптичния преобразувател. Параметърът ЕФО може да бъде използван като мярка, показваща количеството на термичните електрони при отсъствие на полезен светлинен сигнал. Високи стойности на ЕФО водят до намаляване контраста на изображението при ниски осветености и съответно намаляване на разстоянието на действие. Този ефект е най-забележим при наблюдаване на предмети на фона на небето, които имат много слаба осветеност, както и в среда, където нивото на осветеност е много ниска (Night Vision, 2011). Нивото на ЕФО определя най-ниското светлинно ниво, при което един образ може да бъде открит (Homeland Security, 2007). Смята се, че топлинната емисия на електрон от фотокатода води до прекомерно увеличение на ЕФО (Zhu и др., 2013)

Токът на тъмно е комплексен параметър на ЕОП, който определя възможностите на ЕОП да усилва и разпознава слаби светлини сигнали (Bender и др, 2004). Поради това ЕФО се използва в изчисленията за определяне на интегралното прагово (минимално) ниво на полезния светлинен сигнал (Φ) и светлинния шум.

Светлинният поток Φ , попадащ от различни посоки върху повърхността A може да се изрази чрез осветеността E като:

$$(2.12) \quad E = \frac{\Phi}{A}$$

Известно е, че светлинната енергия затихва пропорционално на квадрата на изминатият път (Фиг. 2.3).



Фиг. 2.3. Разпространение на светлинната в среда

Когато източникът на светлина е точков излъчвател, осветеността на сензора се представя по следният начин (Gaussorgues, 1977):

$$(2.13) \quad E = \frac{I \cdot \cos \omega}{R^2}$$

където: I е интензитета на светлината, излъчвана от точков източник; R е разстоянието между точковия източник на светлина и приемника; ω е пространствения ъгъл под който се наблюдава излъчващия обект.

В случай на точков излъчвател, пространствения ъгъл, под които се наблюдава обектът е достатъчно тесен и поради това може да се приеме, че $\cos(\omega) = 1$ (Госсорг, 1988). Тогава може да се запише:

$$(2.14) \quad E = \frac{I}{R^2}$$

От (2.12) и от (2.14) следва че:

$$(2.15) \quad \frac{\Phi}{A} = \frac{I}{R^2}$$

Следователно, крайната зависимост за светлинният поток се представя по следният начин:

$$(2.16) \quad \Phi_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх}} \cdot A_{\text{вх}}}{R^2}$$

където: $\Phi_{\text{вх}}$ е светлинният поток, падащ върху фотокатода на ЕОП, $I_{\text{вх}}$ е интензитета на точковия източник на светлина, $A_{\text{вх}}$ е площта на входния отвор, R е разстоянието между източника на светлина и приемника.

Необходимо е да се определи влиянието на параметъра ЕФО върху енергетичните зависимост на уреда за нощно виждане. ЕФО е в тясна зависимост с праговата чувствителност. В практиката се използва факта, че за нормална работа на устройството, праговата чувствителност μ трябва да е от 3 до 10 пъти по-голяма от ЕФО. Изборът на конкретна стойност за μ зависи от натрупания опит, практическите умения на специалиста и от предназначението на уреда. Използвайки (2.10) и (2.16) може да се определи зависимостта между интензитета на светлинна, идваща от обекта и прага на чувствителност на устройството, като:

$$(2.17) \quad \mu \leq \frac{I_{\text{вх}} \cdot A_{\text{вх}}}{\Phi_{\text{пр}} \cdot R^2}$$

Тогава за разстоянието на действие се получава:

$$(2.18) \quad R \geq \sqrt{\frac{I_{\text{вх}} \cdot A_{\text{вх}}}{\mu \cdot \Phi_{\text{пр}}}}$$

Тази зависимост позволява да се изчисли разстоянието на действие, при което не се отчита затихването на светлинната енергия, която се разпространява от източника до фотокатода.

Известно е, че поглъщането на светлината в дадено вещество се описва от закона на Бугер – Ламберт. Законът представя изменението на интензивността на светлината I в зависимост от изминатото разстояние в дадена среда. Когато светлинен сноп с интензитет I_0 измине разстояние d в някакво оптична среда, то интензитетът намалява до стойност I , поради частичното поглъщане на светлината от веществото (Госсорг, 1988)

$$(2.19) \quad I = I_0 \cdot e^{-kd}$$

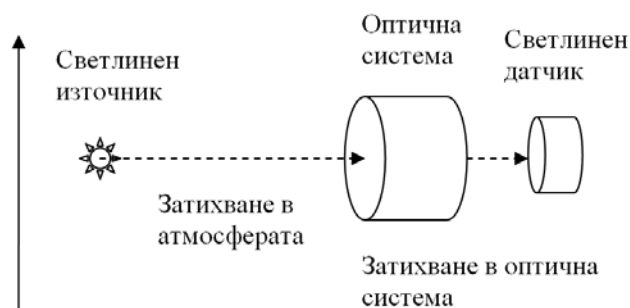
където: k е коефициент на поглъщане на оптичната среда, през която се движи светлината.

Следователно, пропускането на оптичната среда през която се движи светлината, може да бъде изразено чрез:

$$(2.20) \quad \tau_0 = \frac{I}{I_{\text{вх}}}$$

където: I – интензитет на светлината, която се излъчва от наблюдавания обект; $I_{\text{вх}}$ – интензитет на светлината, която попада върху светлинният сензор.

Тази зависимост показва в проценти, каква част от светлината е успяла да достигне до светлочувствителният сензор (Фиг. 2.4).



Фиг. 2.4. Затихване на светлинната

В контекста на изследвания проблем, отразената от наблюдавания обект светлина преминава първо през атмосферата, след това през оптичните детайли на

обектива на УНВ и след това попада върху фотокатода на ЕОП. Като се вземат предвид тези съображения и получените зависимости (2.18) и (2.20), то за разстоянието на действие на УНВ може да се определи следния математически израз:

$$(2.21) \quad R \geq \sqrt{\frac{I \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot A_{ex}}{\mu \cdot \Phi_{np}}}$$

където: R – разстояние на действие в m , I – интензитет на светлината, τ_a – пропускане на атмосферата (безразмерно), τ_o – пропускането на обектива (безразмерно), A_{ex} – площ на входния отвор в m^2 , μ – минимално отношение сигнал/шум (безразмерно), Φ_{np} – праговата чувствителност в lm .

Интензитета на постъпващата светлина и пропускането на атмосферата, са параметри които се определят като външни по отношение на уреда, за разлика от останалите параметри.

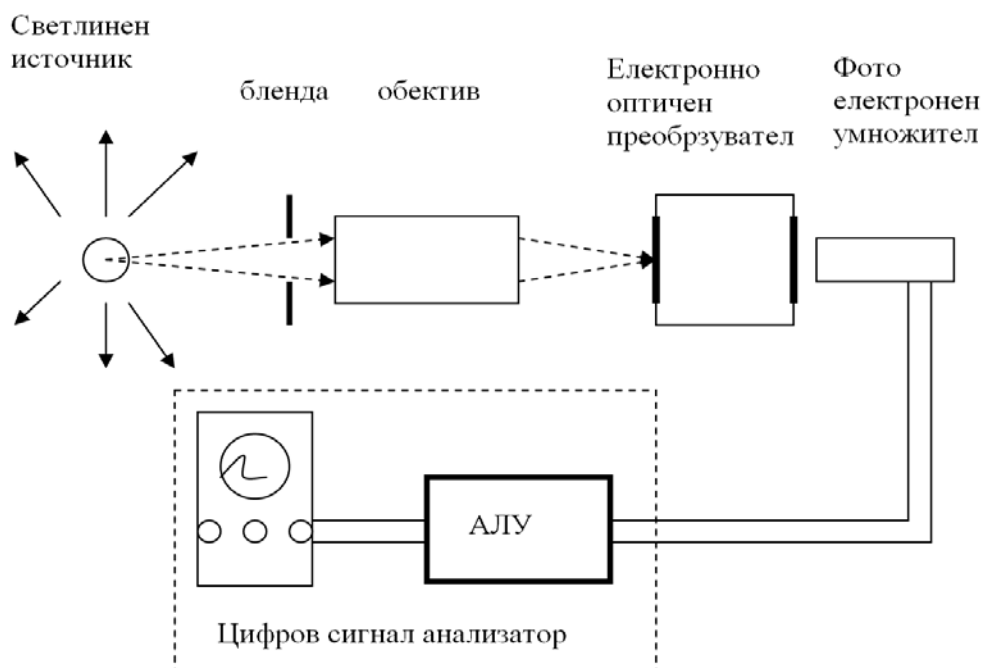
На този етап от изследването е налице математически израз, чрез който може да се определи по теоретичен път разстоянието на действие на нощен уред, в зависимост от неговите оптико-механични характеристики. Един от основните проблеми, цел на настоящето изследване, е да се намери подходящ метод, при който от физически съображения и математически коректно да се установи връзката между температурата на околната среда и параметрите на уреда. В знаменателя на полученото отношение (2.21) се намира произведението от числените стойности на две величини, които са в тясна връзка една спрямо друга. Този факт е от съществено значение за начина, по който може да бъде атакуван горния проблем. Тези две величини са - минималното отношение сигнал/шум (μ) и праговата чувствителност (Φ_{np}). Когато се правят изчисления за дневен наблюдателен уред, чрез тези величини се определят оптично-механичните параметри на уреда, по отношение на физиологичните прагови възможности на субекта, извършващ наблюдението. Известно е, че човешкото око е в състояние да установи разлика в осветеността на два обекта, която е не по-малка от 0.02 - 0.03 lx . Това е граничното условие, което еднозначно определя праговете възможности на оптична система, състояща се от дневен наблюдателен уред и човешко око. В този случай, човешкото око се разглежда като оптичен сензор с определен оптична конфигурация и специфични оптични параметри.

Когато се проектира нощен наблюдателен уред, към описаната система се добавя електронно-оптичен преобразувател, който се явява като трета оптична система, притежаваща собствени специфични оптични, механични, и електронно-оптични характеристики. В този случай, се взема под внимание, че ЕОП притежава параметър *отношение сигнал/шум*, който зависи от температурата и тока на тъмно. По този начин, параметърът *отношение сигнал/шум* определя еднозначно праговете

възможности на целия уред за нощно виждане, чрез влиянието си върху минимално необходимото *отношение сигнал/шум* и *праговата чувствителност*. Този факт е от особена важност за изследването и позволява да се намери и обясни теоретично функционалната зависимост между разстояние на действие на уреда и температурата на околната среда.

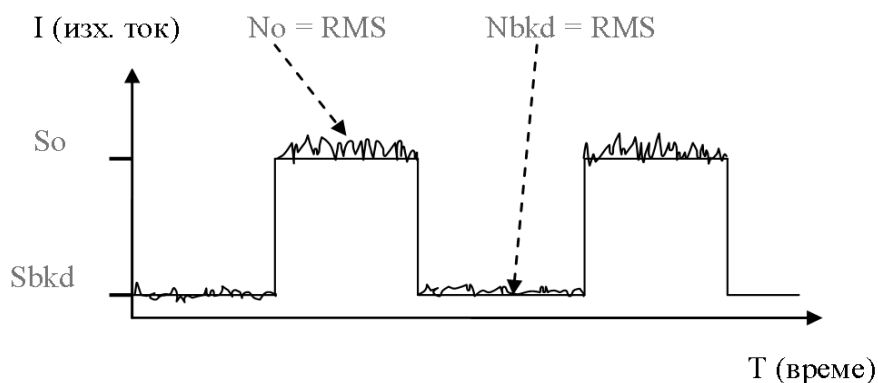
2.3.1. Измерване и същност на параметъра сигнал/шум

Тъй като параметърът *отношение сигнал/шум* определя еднозначно праговите възможности на уреда за нощно виждане, е необходимо да се разгледа същността и начините за неговото измерване. *Отношението сигнал/шум*, посочено в заводските спецификации се измерва в лабораторни условия чрез използването на еталонен източник клас А при стайна температура. Стандартният източник клас А, представлява лампа с нажежаема волфрамова жичка, която е специално оразмерена и при определен захранващ ток и напрежение се нагрива до цветна температура 2856 °К. При тази температура, спектралната характеристика на този източник е подобна на излъчването на звездното небе през нощта. Измерването се извършва за всеки конкретен ЕОП. Електронно-оптичният преобразувател се свързва галванично към необходимите електрически потенциали, които са необходими за неговата нормална работа и които отговарят на заводските му спецификации. Точните стойности на необходимите потенциали са много важни защото те оказват силно влияние върху стойността на параметъра *отношение сигнал шум*. За целите на измерването се използва обектив ($F = 1.4 \pm 5 \%$), разположен между еталонен светлинен източник и ЕОП, както е показано на Фиг. 2.5.



Фиг. 2.5. Измерване на параметъра сигнал/шум на ЕОП

Между светлинния източник и обектива се поставя оптична бленда, която ограничава върху входа на обектива, светло петно с форма на окръжност с определен диаметър. Изискването е да се получи хомогенна осветеност по цялата площ на полученият светлинен кръг, който е така центриран спрямо кръглият отвор на обектива, че цялата светлинна енергия да постъпва в уреда. Обективът е подбран с такова фокусно разстояние, че върху фотокатода на електронно-оптичния преобразувател се фокусира светло петно с диаметър 0.2 mm . Светлото петно, което е фокусирано върху фотокатода е с рязко очертани граници, с форма на правилна окръжност и с хомогенна, равномерна осветеност по цялата площ. Осветеността на фотокатода в този случай е не по-голяма от 10^{-6} lx . На изхода на ЕОП се поставя фотоумножител тип ЕМР модел 541Е или еквивалентен на него, който да притежава същите технически характеристики. Фотоумножителят се разполага по такъв начин, че върху неговият фотокатод да попада максимално количество светлина, която се излъчва от екрана на електронно-оптичния преобразувател. Това се установява чрез получаването на максимален изходен ток на изхода на фотоумножителя. Фотоумножителят е с постоянен коефициент на усилване и усилва линейно светлината, която се излъчва от екрана. На изхода на фотоумножителя се получава електрически ток, който е правопрпорционален и линейно съответства на стойностите на постъпващата светлина. Този електрически сигнал се подава на входа на цифров сигнал анализатор, както е показано на Фиг. 2.6.



Фиг.2.6. Електрически ток на изхода на фотоумножителя

Цифровият сигнал анализатор се състои от два основни функционални модула. Първият от тях е аритметично логично устройство (АЛУ), което е предварително програмирано да извърши точно определени аритметични и логически операции с постъпващите на входа на цифровият сигнал анализатор електрически сигнали. Вторият модул служи за визуализация на различни фази от обработката на сигнала и да представя по подходящ начин крайния резултат.

Принципът на работа при измерването се състои в определяне на отношението на полезния сигнал към средноквадратичната стойност на шумът. За постигането на

тази цел, светлината от еталонния източник се модулира с честота 10 Hz. По този начин на входа на електронно-оптичния преобразувател се задава поредица от светлинни импулси, които попадат върху фотокатода. Електронно-оптичният преобразувател усилва линейно с постоянен коефициент на усилване и светлите и тъмните нива, които се появяват върху фотокатода. Върху екрана се наблюдава периодично във времето, поредица от светване и угасване, следващи с честота десет херца. Фотоумножителят усилва линейно и с постоянен коефициент на усилване светлинните импулси, които се излъчват от екрана. На изхода на фотоумножителя се получава импулсен електрически ток, който съответства на стойностите на входната светлина. Полученият електрически ток е с еталонна честота десет херца и се подава на входа на цифров сигнал анализатор. Операциите, които анализатора извършва, имат за цел да определят отношението сигнал шум по предварително определена точно дефинирана функционална зависимост (Image Intensifiers, Photonis):

$$(2.22) \quad \frac{S}{N} = \frac{(S_0 - S_{bkd})}{\sqrt{K \cdot (N_0^2 - N_{bkd}^2)}}$$

където: S = DC сигнал; N = RMS шум; S_0 = DC изходен сигнал, измерен от сигнал анализира; S_{bkd} = DC фон сигнал, когато отсъства светлина на входа; N_0 = RMS шум, измерено от сигнал-анализатор; N_{bkd} = RMS фоновия шум, измерен от анализатор сигнал, когато отсъства светлина на входа; K – корекционен фактор, за да се получи вярно отношение сигнал-шум при честотна лента от 10 Hz, независимо от честотната характеристика на екрана на електронно оптичния преобразувател. ($K = 1.09$ за P20 фосфор).

Математическата зависимост, чрез която се определя параметъра *сигнал-шум* (S/N) представлява съотношението на DC сигнал към средноквадратичната стойност на шума. На Фиг. 2.6. са показани в графичен вид нивата на полезния постоянно токов сигнал ($S = DC$) и нивата на шума ($N = RMS$).

2.3.2. Дефиниране на температурно зависим коефициент

Повишаването на температурата на околната среда неизбежно води до повишаване на температурата на целият уред. Механичните и оптичните детайли на добре оразмерен уред са устойчиви на такова въздействие и на практика не променят своите качествени характеристики. Най-уязвим в това отношение е ЕОП, при който се наблюдава явлението *ток на тъмно*. Същността на това явление се състои във факта, че в работно положение екрана на ЕОП свети, когато върху фотокатода отсъства светлина. Това специфично присветване (т. нар. сцинтилации) е типичен пример за наличие на светлинен шум. Когато на входа на ЕОП се подаде слаб светлинен сигнал, сцинтилациите се смесват със светлинния образ на наблюдавания обект и в резултат слабият светлинен образ на обекта става неразличим. Стандартният параметър за

представяне на това явление е *еквивалентната фонова осветеност* (ЕФО). Този е параметър дава информация за големината на смущенията, които се появяват върху светлинния образ на електронно-оптичен преобразувател, използван за усилване на слаби светлинни сигнали.

ЕФО дава информация за количеството на електроните, които са достигнали до екрана на електронно-оптичния преобразувател и които са причина за появата на сцинтилации. Тези електрони не са се появили в резултат на въздействието на светлинен сигнал върху фотокатода и не представляват част от електронния образ и следователно, не носят полезна информация за наблюдавания обект, а напротив – внасят шум в полезния светлинен сигнал. С увеличение на температурата се увеличава количеството на т. нар. термични електрони, което води до увеличаване на шума. В резултат на увеличаването на шума на ЕОП, разстоянието на действие на нощният прибор намалява (Разумовский, 2004). Този факт е свързан с физическата същност на явлениято фотоефект, за който опитно са установени следните три закона:

1. При осветяване с монохроматична светлина броят на отделените за единица време от повърхността на катода електрони, е пропорционален на интензитета на светлината.
2. Светлина с дължина на вълната над една определена за дадения катод дължина λ_{max} не предизвиква фотоефект. λ_{max} се нарича червена граница на фотоефекта за дадения катод.
3. Максималната кинетична енергия, с която се отделят електроните от катода, не зависи от интензитета на светлината, а зависи линейно само от нейната честота.

От друга страна, уравнението на Айнщайн за външния фотоефект е пряко следствие от закона за съхранение на енергията и идеите на Планк за излъчването на електромагнитни кванти (Пономарьов, 1989):

$$(2.23) \quad h\nu = A + \frac{1}{2}mV_{max}^2$$

където: h е константата на Планк, ν е честотата на електромагнитната вълна, A е отделителната работа, която трябва да се извърши, за да се отдели електрон от повърхността на метала, m е масата на електрона, V е скоростта на отделения електрон.

Изразът $\frac{1}{2}mV_{max}^2$ представлява максималната кинетична енергия ($E_{ел.мах}$) на отделения електрон:

$$(2.24) \quad E_{ел.мах} = \frac{1}{2}mV_{max}^2$$

Тогава уравнението на Айнщайн може да се запише по следния начин:

$$(2.25) \quad E_{фотон} = A + E_{ел.мах} \text{ или } E_{фотон} - A = E_{електр.мах}$$

Различните материали притежават различни стойности на големината на отделителната работа, чиито порядък е няколко електронволта. Например, за цезий $A=1.8 \text{ eV}$, а за натрий $A=2.3 \text{ eV}$. От уравнението на Айнщайн следва, че електронът ще се отдели от повърхността на материала и неговата кинетична енергия ще придобие положителна стойност, само когато кинетичната енергия на падащия светлинен квант е по-голяма от стойността на отделителната работа. Увеличението на температурата увеличава кинетичната енергия на електроните на фотокатода. Законът за фотоефекта, дефиниран от Айнщайн показва, че в този случай отделителната работа намалява. С увеличението на температурата се повишава и кинетичната енергия на електроните на фотокатода. Това води до повишаване на количеството термични електрони, които са причина за повишаване на шума в светлинния образ, което влошава отношението сигнал/шум и води до намаляване на разстоянието на действие. За да бъде възможно определянето на разстоянието в зависимост от температурата, в настоящето изследване се въвежда температурен коефициент K_T . В най-общ вид този температурен коефициент K_T се определя като:

$$(2.26) \quad K_T = f(T)$$

където: T е температура в градуси Целзий, а функцията $f(T)$ ще отразява законът, по който се променя K_T в зависимост от температурата.

Стойностите на този температурен коефициент K_T са различни за различните видове фотокатоли при дадена температура. По дефиниция, с увеличаване на температурата, температурният коефициент K_T намалява, т.е.:

$$(2.27) \quad K_T \approx \frac{1}{T}$$

Приема се, че при температурата, при която са измерени параметрите на ЕОП, показани в неговите технически спецификации, $K_T=1$.

Като се вземе предвид (2.21) и (2.26) може да се изрази разстоянието на действие на УНВ като функция на температурата по следният начин:

$$(2.28) \quad R_t = K_T \cdot \sqrt{\frac{A_{ex} \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot I}{\mu \cdot \Phi_{пр.фк}}}$$

където K_T е въведения температурно зависим коефициент.

Работната температура на електронно-оптичните преобразуватели, независимо от тяхното поколение, се движи в границите от минус 35 - 45 °С, до плюс 42 - 50 °С. Извън този температурен диапазон настъпват необратими увреждания на електронно-оптичния преобразувател и той става негоден за употреба.

За да се определи функционалната зависимост на K_T от температурата е необходимо да се проведат съответни експериментални изследвания. За целта се използва електронно-оптичен преобразувател на фирмата DEP, произведен през 2005

г. Техническата спецификация задава гранични стойности на работната му температура, които са в интервала от минус 45 °С, до плюс 50 °С. За да се предотврати повреждане на ЕОП, като горна граница за експерименталните изследвания е определена температурата +49 °С, т.е.:

$$(2.29) \quad T_{max} = +49^{\circ}C$$

Съгласно известният военен стандарт (MIL-STD-1858, Homeland Security, 2007), параметрите на електронно-оптични преобразуватели се измерват в лабораторни условия при температура на околната среда 21 °С. При температури по ниски от 21 °С, параметрите на електронно-оптичните преобразуватели би следвало се подобряват, поради намаленото количество на термичните електрони (Разумовскии, 2004). Цел на настоящото изследване е да се определи как се влошава работата на уреда при увеличаване на температурата. Долната граница на изследваният температурен диапазон се приема равна на 21 °С:

$$(2.30) \quad T_{min} = +21^{\circ}C$$

За да се определи диапазона на изменение на въведения температурен коефициент K_T при повишаване на температурата, се използва факта, че параметрите на електронно оптичните преобразуватели, съгласно стандарта (MIL-STD-1858, Homeland Security, 2007), се измерват при температура +21 °С. По дефиниция, температурно зависимият коефициент K_T при тази температура ще има стойност равна на единица, а за температура по-висока от 21 °С, K_T ще има стойност по-малка от единица. Следователно, във формулата за разстоянието на действие, получена чрез енергетичен разчет, може да се използва въведения температурен коефициент по следния начин:

$$(2.31) \quad R_t = K_T R_{21}$$

където: K_T е температурно зависим коефициент; R_t е разстоянието на действие при от температура, по-висока от 21 °С; R_{21} е разстояние на действие при температура 21 °С, изчислено чрез формула, базирана на енергетичен разчет, за теоретично изчисляване на разстоянието на действие на УНВ; K_T е температурен коефициент.

Използваният н настоящето изследване метод за определяне на стойностите на K_T при различни температури се свежда до решаването на обратната задача на (2.31):

$$(2.32) \quad K_T = \frac{R_t}{R_{21}}$$

В (2.32) като неизвестен параметър се разглежда K_T , а разстоянието на действие R_t се определя експериментално при различни температури. От анализа на експерименталните данни ще се търси определяне вида на функционалната зависимост на K_T от температурата. След провеждане на експериментите и определяне функцията на изменение на K_T от температурата, ще бъде възможно използването на

този коефициент и за други изрази, позволяващи изчисляването на разстоянието на действие.

2.4. Определяне разстоянието на действие на УНВ с отчитане на температурата

Чрез метода на енергетичния разчет се получават различни математически изрази, чрез които е възможно изчисляването разстоянието на действие на УНВ, но в тях в явен вид не присъства температурата като параметър. Предлага се обобщен метод за определяне на разстоянието на действие на УНВ с отчитане на температурата на околната среда. Този метод се базира на използване на въведения температурно зависим коефициент и различни зависимости за определяне на разстоянието на действие чрез енергетичен разчет.

В (Елизаренко и др 1981; Разумовский, 2001; Тымкул, 2001, Якушенков, 1999; Тымкул, 1993) е разгледан подход, използващ енергетичен разчет за изчисляване разстоянието на действие на УНВ чрез потока Φ (или осветеността E), създаван от полезния сигнал на входа на уреда. В общият случай, се извършват действия в определена последователност: 1) определя се прага на чувствителност на уреда Φ_{np} , или праговата осветеност E_{np} на входа на уреда; 2) избира се необходимото съотношение сигнал/шум между Φ и Φ_{np} , $M=\Phi/\Phi_{np}$ или ($M = E/E_{np}$); 3) решава се полученото уравнение спрямо един от участващите в него параметри.

Уравнението на ефективният поток от фона, попадащ върху фотокатодана ЕОП може да се представи чрез израза (Тымкул и Тымкул, 2005; Dudzik 1993):

$$(2.33) \quad \Phi_{\phi.ef} = L_{\phi}(\lambda) \cdot A_{in} \cdot \omega_{zp} \cdot K_{\phi} \text{ [W]}$$

където яркостта на фона $L_{\phi}(\lambda)$ се определя с:

$$(2.34) \quad L_{\phi}(\lambda) = \frac{E}{\pi} \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) \cdot d\lambda \text{ [W/sr m}^2\text{]}$$

където: E – осветеност в lx, $\rho_{\phi}(\lambda)$ – спектрален коефициент на отражение на фона, A_{in} – площ на входната зеница в m^2 , ω_{zp} – ъглово зрително поле на уреда в стерadianи sr.

Коефициентът на използване на потока от фотокатода K_{ϕ} може да се определи като (Тымкул и Тымкул, 2005):

$$(2.35) \quad K_{\phi} = \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot d\lambda$$

Участващите в (2.35) τ_a и τ_o са интегрални коефициенти на пропускане на атмосферата и на входната оптична система, в диапазона на работа на фотокатода на ЕОП, а $\phi(\lambda)$ е неговата спектрална чувствителност.

Замествайки $L_{\phi}(\lambda)$ в (2.33) и вземайки предвид, че за определена дължина на вълната е в сила $\tau_a(\lambda) = \tau_a$, $\tau_o(\lambda) = \tau_o$, $\phi(\lambda)=S$, се получава:

$$(2.36) \quad \Phi_{\phi,ef} = \frac{E \cdot A_{in} \cdot \omega_{zp} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S}{\pi} \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) d\lambda$$

Ако се обозначи с $K'_{\phi} = \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) d\lambda$,

то окончателно се получава:

$$(2.37) \quad \Phi_{\phi,ef} = \frac{E \cdot A_{in} \cdot \omega_{zp} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot K'_{\phi}}{\pi}.$$

Аналогично за обект с ъглов размер ω_{ob} е в сила:

$$(2.38) \quad \Phi_{ob,ef} = \frac{E \cdot A_{in} \cdot \omega_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot K'_o}{\pi}$$

където: $K'_o = \int_{\Delta\lambda} \rho_o(\lambda) d\lambda$, а $\rho_o(\lambda)$ е спектрален коефициент на отражение на обекта.

При наличие на обект в зрителното поле, ефективният поток от фона намалява до:

$$(2.39) \quad \Phi'_{\phi,ef} = \frac{E \cdot A_{in} \cdot (\omega_{zp} - \omega_{ob}) \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot K'_{\phi}}{\pi}$$

За сумарния поток от обекта и фона се получава:

$$(2.40) \quad \Phi_{\Sigma ef} = \Phi_{ob,ef} + \Phi'_{\phi,ef}$$

Разликата в потоците, получавани от обекта и от фона, попадаща върху фотокатода е:

$$(2.41) \quad \Delta\Phi_{ef} = \Phi_{\Sigma ef} - \Phi_{\phi,ef} = \Phi_{ob,ef} + \Phi'_{\phi,ef} - \Phi_{\phi,ef}$$

Пространствените ъгли на наблюдение на фона и обекта са ω_{zp} и ω_{ob} . Пространственият ъгъл на фона може да се определи, като:

$$(2.42) \quad \omega_{zp} = \frac{A_{\phi}}{R^2} [\text{sr}]$$

и аналогично за пространствения ъгъл на наблюдение на обекта е в сила

$$(2.43) \quad \omega_{ob} = \frac{A_{ob}}{R^2} [\text{sr}]$$

където R е разстоянието до наблюдавания обект/фон в метри, а A_{ϕ} и A_{ob} са площите на фона и обекта в m^2 .

За разликата между потоците от фона и от обекта се получава:

$$(2.44) \quad \Delta\Phi_{ef} = \frac{A_{ob} A_{in} \tau_o \tau_a E S}{R^2 \pi} |K'_o - K'_{\phi}|$$

Означавайки с $K = |K'_o - K'_{\phi}|$ контраста между наблюдавания обект и фона, се получава крайната формула за разликата в светлинните потоци:

$$(2.45) \quad \Delta\Phi_{ef} = \frac{A_{ob} A_{in} \tau_o \tau_a E S}{R^2 \pi} K$$

За нормалната работа на уреда, ефективният поток трябва да превишава праговия поток с величината μ , характеризираща отношението сигнал/шум ($\Delta\Phi_{ef} \geq \mu \Phi_{np,фк}$). Като се вземат предвид горните зависимости, може да се получи следното представяне:

$$(2.46) \quad \frac{A_{ob} \cdot A_{in} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot E \cdot S \cdot K}{R^2 \cdot \pi} \geq \mu \cdot \Phi_{np}$$

Така полученото енергетично уравнение (2.46) може да бъде решавано относно избран негов параметър. Основната трудност тук се състои в това, че на този етап от проектирането на уреда, са неизвестни повече от един параметри. Поради това, се задават стойности на част от неизвестните параметри и се решава спрямо един от тях. Използвайки така получената зависимост може да се изведе следната формула, за определяне на разстоянието на действие на уреда:

$$(2.47) \quad R \geq \sqrt{\frac{A_{ex} \cdot A_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot E \cdot S \cdot K}{\pi \cdot \mu \cdot \Phi_{np}}}$$

В тази зависимост участват почти всички външни условия, при които се реализира наблюдението като площ на наблюдавания обект (A_{ob}), осветеност (E), контраст между фона и наблюдавания обект (K) и пропускане на атмосферата (τ_a). Известно е, че температурата е променлива величина, която се мени както в рамките на едно денонощие, така и в рамките на годишни сезони и географски ширини. Следователно, отсъствието на температурата като променлив параметър може да се разглежда като недостатък на тази формулировка. Поради това е необходимо да бъде установено наличието на такава зависимост и възможността за нейното интегриране в УНВ параметъра *разстояние на действие*. Като се вземат предвид (2.31) и (2.47), то може да се запише следната зависимост за определяне разстоянието на действие на УНВ:

$$(2.48) \quad R = K_T \sqrt{\frac{A_{ex} \cdot A_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot E \cdot S \cdot K}{\pi \cdot \mu \cdot \Phi_{np}}} \approx \frac{1}{T} \sqrt{\frac{A_{ex} \cdot A_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot E \cdot S \cdot K}{\pi \cdot \mu \cdot \Phi_{np}}}$$

В така получения израз (2.48), разстоянието на действие се представя като функция от различни външни условия за наблюдение, включително и от температурата на околната среда.

В (Гоев, 2002) е предложен математически израз за определяне разстоянието на действие на ОНВ, като функция от параметрите на обектива – пропускане на оптичните елементи, диаметър на входната зеница, интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП, разделителната способност на уреда и външни условия на наблюдение – пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност и контраст между наблюдавания обект и фона:

$$(2.49) \quad R = 3.10^5 \sqrt{\frac{\tau_o \tau_a D_{ex} S E K}{\mu \gamma}}$$

където: τ_o – пропускане на оптичната система; τ_a пропускане на атмосферата; D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m ; S – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm ; E – естествена нощна осветеност в lx ; K – контраст, μ – отношение сигнал/шум; γ – разделителната способност на уреда в rad .

В тази формула (2.49) за определяне на разстоянието на действие участва разделителната способност на уреда и се отчита интегралната чувствителност на фотокатода на ЕОП, но не се взема предвид влиянието на температурата. Като се вземе предвид (2.31) и (2.49), може да се получи следния израз:

$$(2.50) \quad R_t = K_T \cdot 3.10^5 \sqrt{\frac{\tau_o \tau_a D_{ex} S E K}{\mu \gamma}}$$

В така получения израз (2.50) разстоянието на действие се определя като функция на температурата.

Друг възможен подход за теоретично определяне на разстоянието на действие е предложен в (Borissova и Mustakero, 2006) чрез използване на параметрите на отделните елементи и отчитане на външните условия на наблюдение:

$$(2.51) \quad R = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{ob} \tau_o \tau_a S \delta_{EOП} E A_{ob} K}{M \Phi_{пр.фк}}} [m]$$

където: D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m ; f'_{ob} – фокусно разстояние на обектива в mm ; τ_o – пропускане на обектива, τ_a – пропускане на атмосферата; S – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm ; $\delta_{EOП}$ – разделителната способност на ЕОП в lp/mm ; E – естествена нощна осветеност в lx ; A_{ob} – площ на наблюдавания обект в m^2 , K – контраст между наблюдавания обект и фона; M – отношение сигнал/шум; $\Phi_{пр.фк}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm .

Основавайки се на (2.31) и (2.51) може да се запише следната модификация на формулата за определяне на разстоянието на действие с отчитане на температурата:

$$(2.52) \quad R = K_T \cdot \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{ob} \tau_o \tau_a S \delta_{EOП} E A_{ob} K}{M \Phi_{пр.фк}}}$$

Така получената зависимост (2.52) определя връзката между отделните параметри на съставните елементи (модули) на УНВ и едновременно с това отчита всички външни условия на наблюдение, включително и температурата на околната среда.

Тази зависимост между параметрите на УНВ и външните условия на наблюдение може да бъде използвана за разработването на методология за определяне

на диапазона на изменение на външните условия, при запазване на едно и също разстояние на действие на уред, притежаващ определени технически характеристики.

Такава методология е необходима, тъй като в каталожните спецификации на УНВ се дава конкретна стойност на разстоянието на действие, при конкретни външни условия за наблюдение. Това не е достатъчно като информация за потребителя относно качеството на уреда. В този случай обикновено възникват въпроси, свързани с това какъв трябва да е уредът, за да е възможно да се наблюдава конкретен обект, но при различни от каталожните външни условия. Много често въпросът е свързан с възможностите на уреда за работа в условията на силно променяща се температура.

Освен това при научноизследователската и развойна дейност е от съществено значение да се създаде вярна теоретична оценка за възможностите на УНВ, който е в процес на разработка.

2.5. Методология за определяне на различни комбинации на външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ

Важните параметри на УНВ присъстват в техническите спецификации на всеки уред. За параметъра *разстояние на действие* обикновено се дава недостатъчна информация за външни условия, при които е определено това разстояние и не са редки случаите, когато такава информация изобщо липсва. Ето защо от потребителска гледна точка е полезно да бъде определен диапазона на изменение на външните условия на наблюдение, при които съответният уред ще има същото разстояние на действие. Параметрите, които влияят на разстоянието на действие, включват както:

- *разделителна способност на ЕОП* – мярка за това колко линии с различна интензивност (светло до тъмно) могат да бъдат различени в рамките на един милиметър площ на екрана;
- *отношение сигнал-шум* – мярка за светлинния сигнал, достигащ окото, разделен на шума, който се вижда с просто око (Higginbotham, 2006; Riegler et al. 1991);
- *фотокатодна чувствителност на ЕОП* – способността на фотокатодния материал да отделя електрони, при облъчване с фотони (Task, 1992);
- *диафрагмено число* – изразява отношение на фокусното разстояние на обектива към диаметъра на входната зеница (Borissova & Mustakeroov, 2008);
- *естествена нощна осветеност* – пасивните УНВ използват околната светлина от звезди и луна и т.н. (Marasco et al., 2003);
- *пропускане на атмосферата* – зависи от температурата на въздуха; атмосферно налягане; относителна влажност; брой, размер и разпределение на атмосферните аерозоли; концентрация на необичайни атмосферни съставки като дим, прах, изгорели газове, химически отпадни води, както и

коэффициентите на пречупване на всички видове аерозоли в оптичния път (Indiso, 1970; Ohkawara, 2012);

- *контраст между фона и наблюдаваният обект* – монохроматична разлика между наблюдавания обект и фоновия интензитет;
- *тип на наблюдавания обект* – човешка фигура, военен джип, танк, или друга бойна техника (Borissova & Mustakerov, 2006; Russell & Lombardo, 1998).

Използвайки всички тези параметри, могат да бъдат формулирани съответни задачи за определяне на гранични параметри на външните условия на наблюдение, съответстващи на зададеното в техническата спецификация разстояние на УНВ.

2.5.1. Определяне на гранични параметри на външните условия на наблюдение за УНВ със зададено разстояние на действие

Разстоянието на действие на УНВ, може да бъде изчислено теоретично чрез функционалната зависимост (2.52). За участващите в тази зависимост параметри може да се каже следното:

Пропускането на атмосферата варира в тесен интервал от (0.712 - 0.804) (Indiso, 1970). От 1933 до края на 1940 г., коефициентът на пропускане е останал стабилен на ниво от около 0.74 до 0.75, в средата на 1980 г. е достигнато 0.69 и след това се е увеличил нивото на 0.71 в началото на 2000 г. (Ohkawara, 2012). Поради това, пропускането на атмосферата може да се счита за постоянна величина.

Минималната стойност на естествената нощна осветеност и максималната стойност на контраста между обекта и фона, и обратно, представляват две гранични условия за конкретно разстояние на действие. Те обаче не могат да бъдат определени от (2.52), тъй като се получава едно уравнение с две неизвестни. Теоретичните минимални или максимални стойности на осветеност и контраст в (2.52), в общия случай може да не бъдат достигнати за конкретно разглеждан уред. Тези две гранични стойности за осветеността и контраста при определен обект за наблюдение и разстояние на действие могат да бъдат определени с помощта на формулиране на двукритериална задача.

Едно от граничните условия съответства на максимална естествена нощна осветеност и минимален контраст между наблюдавания обект и фона, което може да бъде изразено като **Задача 1а** (Borissova и др, 2014):

$$(2.53) \quad \begin{cases} \max K = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{\min}}{0.07 \cdot D_{\text{ex}} \cdot f_{\text{об}} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_{\Sigma} \cdot \delta \cdot E \cdot A_{\text{target}}} \right) \\ \min E = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{\min}}{0.07 \cdot D_{\text{ex}} \cdot f_{\text{об}} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_{\Sigma} \cdot \delta \cdot K \cdot A_{\text{target}}} \right) \end{cases}$$

при ограничения:

$$(2.54) \quad E^l \leq E \leq E^u$$

$$(2.55) \quad K^l \leq K \leq K^u$$

$$(2.56) \quad A^l \leq A_{target} \leq A^u$$

където с E^u , K^u , A^u и E^l , K^l , A^l са означени горните и долните граници на естествената нощна осветеност, контраста и редуцираната площ на наблюдавания обект; R е зададеното каталожно разстояние на откриване в метри; μ , Φ_{min} , D_{ex} , f_{ob} , τ_o , S_Σ и δ са константи, зависещи от конкретния уред.

Второто гранично условие съответства на минимална естествена нощна осветеност и максимален контраст между наблюдавания обект и фона, изразено като Задача 2а (Borissova и др, 2014):

$$(2.57) \quad \begin{cases} \min K = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min}}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot E \cdot A_{target}} \right) \\ \max E = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min}}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot K \cdot A_{target}} \right) \end{cases}$$

при ограничения (2.55) – (2.57).

Чрез получената зависимост за разстоянието на действие (2.53) може за по-прецизно да се определят на условията на наблюдение, като се включи и въведения температурно зависим коефициент (2.27). Следователно задача 1а може да се трансформира като задача 1b:

$$(2.58) \quad \begin{cases} \max K = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot E \cdot A_{target}} \right) \\ \min E = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot K \cdot A_{target}} \right) \end{cases}$$

при същите ограничения (2.55) – (2.57).

Аналогично, задача 2а се трансформира в Задача 2b:

$$(2.59) \quad \begin{cases} \min K = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot E \cdot A_{target}} \right) \\ \max E = \left(\frac{R^2 \cdot \mu \cdot \Phi_{min} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f_{ob} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S_\Sigma \cdot \delta \cdot K \cdot A_{target}} \right) \end{cases}$$

при същите ограничения (2.55) – (2.57).

Така формулираните задачи могат да бъдат интегрирани като етап на методология за определяне на различни комбинации от външни условия, при които зададеното устройство постига същото разстояние на действие като това в неговите каталожни спецификации. Етапите и последователността на изпълнение на предложената методология са показани на Фиг. 2.7.



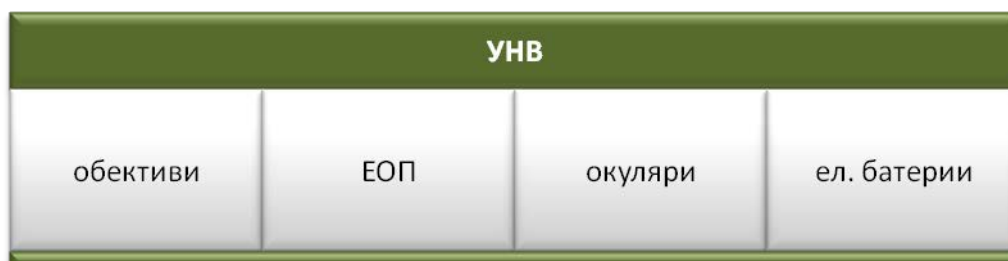
Фиг. 2.7. Методология за определяне на условията на наблюдение, при постоянно разстояние на действие

Първият етап от методологията включва извличане на информация за параметрите на УНВ от каталожните данни. На следващия етап се определят допустимите стойностите (горни и долни граници) на нощната осветеност и контраста между наблюдавания обект и фона. Определя се типа на наблюдавания обект, например – човешка фигура в цял ръст, джип, танк и т.н. След това се формулира Задача 1 (максимална нощна осветеност и минимален контраст) и Задача 2 (минимална нощна осветеност и максимален контраст) и се избира метод за решаване на формулираните задачи. За по-голяма прецизност при определяне на графиката могат да бъдат изчислени една или повече междинни точки за горните стойности и да се начертае и самата графика. При необходимост от определяне на диапазон на изменение на външните условия за различен обект на наблюдение, процедурата се повтаря. Ако не се интересуваме от друг обект се преминава към край.

Описаната методология позволява да бъдат определени различни комбинации на външните условия за наблюдение, съответстващи на параметрите на конкретния УНВ.

2.6. Алгоритъм за предварителна оценка на проектирането на УНВ при зададени външни условия

Основните модули на пасивни уреди за нощно виждане могат да бъдат редуцирани до обективи, ЕОП, окуляри и електрическо захранване, както е показано на Фиг. 2.8. (Borissova и др, 2013)



Фиг. 2.8. Основни модули на УНВ

Предложеният подход за предварителна теоретична оценка на проект на УНВ може да се реализира, като се вземат предвид всички параметри на описаните основни модули. Освен това, съществуващите разновидности на УНВ като очила, бинокли и прицели, трябва да се разглеждат като се спазват съответните специфични ограничения за съвместимост между модулите. Това може да стане чрез разработване на подходящ обобщен математически модел на УНВ, описващ спецификата на различните устройства. Разглеждайки процеса на дизайн на УНВ като проблем на вземане на решение, се предполага, че съществува потребител и окончателното решение зависи от неговите предпочитания към параметрите на съответното устройство.

От практическа гледна точка, най-важният за потребителя параметър е *разстоянието на действие*. Това е причината, поради която основната идея на алгоритъма е определяне на теоретична оценка за разстоянието на действие чрез използване на зависимостта (2.52). Потребителят може да получи представа за разстоянието на действие на УНВ преди да се изработи неговия и тества прототип на уреда. Различни оценки могат да се симулират, като се използват различни комбинации от модули за УНВ, докато получените резултатите станат достатъчно близки до желаните от потребителя стойности.

Три разновидности на разстоянието на действие (откриване, разпознаване и идентификация) могат да бъдат получени, използвайки критериите на Jonson (Borissova & Mustakerov, 2006) и зависимостта (2.52). Критериите на Jonson имат статистически характер и влиянието на околната температура влияе еднакво независимо от използваната разновидност на разстоянието на действие.

Увеличението на УНВ (α) може да се представи като отношение на фокусните разстояния на обектива и окуляра и увеличението (β) на използвания ЕОП.

$$(2.60) \quad \alpha = \beta \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

В случая на очила за нощно виждане, общото увеличение на уреда е $\alpha = 1$ (т.е. няма увеличение). Когато се проектират бинокли и прицели, то увеличението е винаги по-голямо от единица, т.е. $\alpha > 1$.

- зрително поле – зрително поле на УНВ е в пряка зависимост от фокусното разстояние на обектива и диаметъра на фотокатодана ЕОП:

$$(2.61) \quad f_{ob} = D_{ИТр\phi} \left(2tg\left(\frac{\omega}{2}\right) \right)^{-1}$$

където f_{ob} е фокусното разстояние на обектива в mm, ω е зрителното поле в градуси, $D_{ИТр\phi}$ е диаметър на фотокатода на ЕОП в mm.

Времето за продължителна работа с ел. батерии L_B зависи от капацитета на използваните батерии C_B и от тока $I_{ИТ}$, който е необходим за работата на използвания ЕОП. Тази връзка може да бъде записана чрез следното уравнение (Borissova, 2006):

$$(2.63) \quad L_B = \frac{C_B}{I_{ИТ}}$$

Типичното захранващо напрежение за ЕОП е 3.0 V. Съществуват две основни разновидности на батериите, които могат да бъдат използвани – батерии тип АА с напрежение 1.5 V и клетъчен тип с напрежение 3.0 V. Възможно е да бъдат използвани различен брой последователно и/или паралелно свързани батерии. Това може да бъде изразено чрез следната зависимост за общият капацитет на захранването C_B :

$$(2.64) \quad C_B = n \sum_{p=1}^t a_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p C_B^q$$

където n – брой на паралелно свързаните батерии, a_p – двоични променливи за батериите от 3V или 1.5 V, b_q^p – двоични променливи за батерии разновидностите на батериите от 3V или 1.5 V, C_B^q – капацитет на различните типове батерии от 3 V или от 1.5 V.

Едно добро приближение за теглото и цената на УНВ може да се получи като се сумират съответно теглата/цените на съответните модули на УНВ (ЕОП, обектив, окуляр и електрическо захранване):

$$(2.65) \quad Weight_{NVD} = W_{ИТ} + W_{ob} + W_{oc} + W_{battery}$$

$$(2.66) \quad Price_{NVD} = P_{ИТ} + P_{ob} + P_{oc} + P_{battery}$$

Теглото на батерийно захранване се определя от конкретния тип батерии (1.5V или 3 V) и техния брой и може да бъде представено чрез следната зависимост:

$$(2.67) \quad W_{battery} = n \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p H_B^q + \sum_{p=1}^t t_p \right) \right),$$

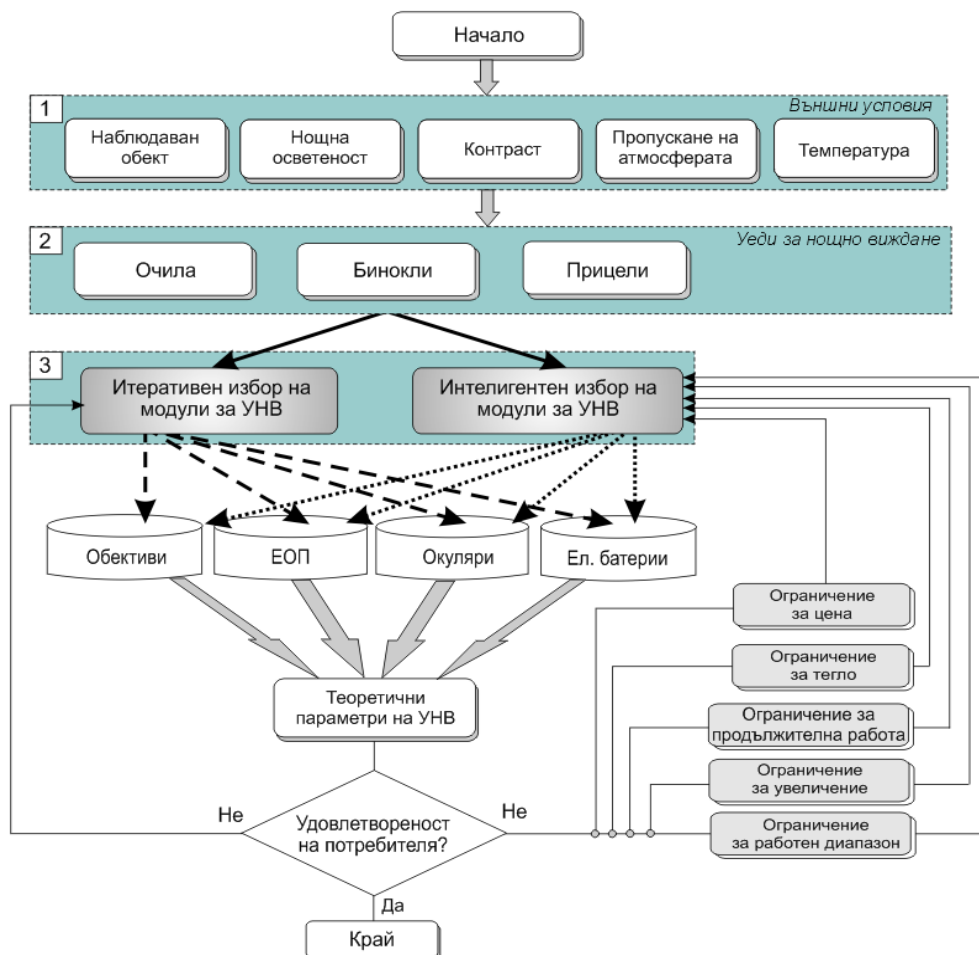
където H_B^q – тегло на конкретния вид електрическа батерия, t_p – тегло на единачната батерия, $s_p = 1$ за 3 V батерия и $s_p = 2$ за батерия от 1.5 V.

Аналогично, цената на електрическо захранване зависи от използвания тип батерии и техния брой и може да бъде представена чрез следната зависимост:

$$(2.68) \quad P_{battery} = n \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p P_B^q + \sum_{p=1}^t k_p \right) \right)$$

P_B^p – цена на типа батерийно захранване, k_p – цена на отделната единична батерия.

Описаният по този начин математически модел, може да бъде интегриран в подходящ алгоритъм, за определяне на предварителна теоретична оценка на параметрите на симулираните УНВ. Разработеният алгоритъм за проектиране на различни типове УНВ взема предвид както зависимостите между отделните модули и спецификата на различните типове УНВ, така също и конкретни изисквания на потребителя. Обобщената диаграма на предложения алгоритъм е показана на Фиг. 2.9.



Фиг. 2.9. Блок-схема на предложения алгоритъм

Предложеният алгоритъм започва с дефиниране на външни условия за наблюдение. Поради спецификата на УНВ е важно да се вземат предвид различните

условия на наблюдение при процеса на проектиране. Най-важният параметър УНВ, разстоянието на действие, се влияе както от параметрите на отделните модули на устройството, така и от външни условия за наблюдение. На втория етап се избира предназначението на уреда за нощно виждане (очила, прицел, бинокъл). Третият етап включва двата клона на алгоритъма – итеративен или интелигентен избор на модули. Итеративният клон на алгоритъма позволява на потребителя да направи собствен избор на съвместими модули за избрания тип устройство и да определи параметрите на проектирания уред като цяло, вземайки предвид определените външни условия. Ако потребителят не е доволен от изчислените параметри на проектираното устройство, той може да избере други модули. Този интерактивен процес на проектиране приключва когато потребителят е удовлетворен от получените параметри на симулираното устройство. Вторият клон на алгоритъма позволява на потребителя да зададе някои предварителни изисквания относно параметрите на проектираното устройство. Основната идея на този интелигентен избор на модули е да се намери такава допустима комбинация от модули, която да отговаря на зададените изисквания на потребителя. Алгоритмичната реализация на интелигентния избор се основава на определяне на параметрите на всички възможни комбинации от модули и да покаже точно тази комбинация, която най-добре отразява зададените предпочитания на потребителя. Ако такава комбинация не съществува, на екрана се показва подходящо съобщение, така че потребителят да получи допълнителна информация за параметъра, чието ограничение трябва да се промени. За целта се използват сортирани масиви с данни. Ако е зададено ограничение за стойността на разстоянието на действие или ограничение за стойността на увеличението на уреда, то процесът на търсене започва от малките към големите стойности в съответните сортирани масиви, докато бъде достигната стойност по-голяма или равна на зададената. При задаване на ограничения за теглото и цената, процесът на търсене започва от големите към малките стойности в съответните сортирани масиви, докато бъде достигната стойност по-малка или равна на зададената. Ако са въведени недопустими ограничения за проектираното устройство, които не могат да бъдат удовлетворени, то се показва съответно съобщение, за да подпомогне потребителя да направи съответните корекции.

Използването на описания алгоритъм за оценка на параметрите на проектираните УНВ да бъдат симулирани различни сценарии на проектиране, като същевременно се вземат предвид и конкретни зададени комбинации на външните условия за наблюдение.

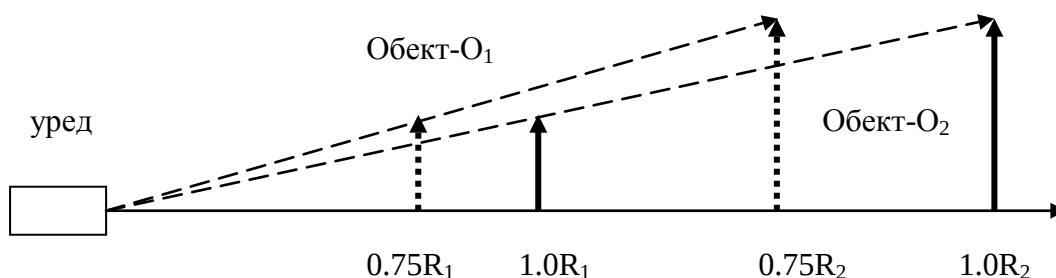
ГЛАВА 3.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В тази глава са описани проведените експериментални изследвания на разработените метод за определяне влиянието на температурата върху разстоянието на действие на УНВ. Чрез експериментални изследвания на разстоянията на действие при различни температури са определени стойности на въведения температурно зависим коефициент и неговата функционална зависимост от температурата. На базата на реални данни е тествана методологията за определяне на различни комбинации на външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ. Описан е изследователски прототип на уеб-базирано приложение, в което е реализиран предложеният алгоритъм за оценка на параметрите на проектираните УНВ.

3.1. Описание на проведените експериментални изследвания за влияние на температурата върху параметрите на УНВ

Уредите за нощно виждане се използват за наблюдаване на отдалечени обекти в условията на естествена нощна осветеност. В такива случай разстоянието на действие е от порядъка на стотици метри. Съвсем логично възникват следните два въпроса: Възможно ли е и до колко е оправдано изследването на разстоянието на действие в лабораторни условия, когато обекта е отдалечен на няколко метра? Отговорът на тези въпроси е положителен и се базира на законите на геометричната оптика (Вълева, 1993). На Фиг. 3.1. е показано процентно намаляване разстоянието на действие за два различно отдалечени еталонни наблюдавани обекти.

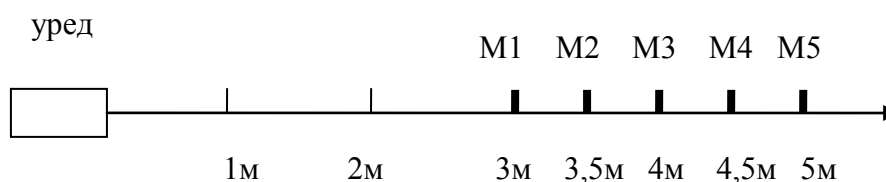


Фиг.3.1. Процентно намаляване разстоянието на действие.

Обект O_2 се намира на разстояние R_2 от уреда, и обект O_1 се намира на разстояние R_1 от уреда. Обекта O_2 е два пъти по голям от обекта O_1 , и разстоянието R_2 е два пъти по голямо разстоянието R_1 . При повишаване на температурата разстоянието на действие намалява, което води да промяна на зрителния ъгъл и за двата еталонни

обекта, които се забелязват на по-малки разстояния (по-малки с 25%). Реперните вектори, показани на Фиг. 3.1 с прекъсната линия, се наблюдават под еднакъв зрителен ъгъл и се намират на разстояния $0.75R$. От фигурата става ясно, че процентното намаляване на разстоянието на действие на нощният уред по отношение на двата обекта е еднакво. Това означава, че и в този случай важат законите на геометричната оптика. Следователно, експериментите могат да бъдат проведени в лабораторни условия при предварително фиксирани разстояния на действие на УНВ. Измерените резултати за процентно намаляване разстоянието на действие, ще бъдат верни за разстояния на действие, измерени при провеждане на полеви изпитания.

От теоретична гледна точка, е възможно реализирането и коректно използване на опитна постановка с 5 мири, показана на Фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Разположение на мири спрямо уреда

Използваните пет мири са означени с главна буква М и пореден номер. Разположението спрямо уреда е както следва: Мира 5 се намира на разстояние 5 метра от фокалната равнина на обектива на уреда, а останалите четири мири са разположени една от друга на разстояние 0.5 метра. По този начин, в низходящ ред, всяка следваща мира се намира на разстояние, което е с 10% по-близо до уреда. Наблюдението се извършва върху един и същ елемент на различните мири. При провеждане на експерименти с повишена температура на околната среда (респективно на УНВ) се регистрира намаляването на разстоянието на което е възможно да бъде наблюдаван съответния елемент. Броят на мири, начинът на тяхното разположение, и разстоянията между тях се определят от конкретните цели на провеждания експеримент.

Измерването на разстоянието на действие се извършват на два етапа, при което се използват мири с различни размери. На първия етап са използвани три мири за определяне на общата зависимост и характера на кривите за разстояние на действие, както и влиянието на температурата, при различни нива на осветеност. На втория етап са използвани пет мири при еднаква осветеност (10^{-7} lx), като се измерва разстоянието на действие при повишаване на околната температурата.

3.1.1. Използвана апаратура

Уредът, с който са проведени експериментите, е *"ПРИЛЕП-М"* *нощен монокуляр*, представляващ защитено с авторски права „Приспособление за нощно гледане” (Патент 7826, 2013). Нощният монокулярен уред *"ПРИЛЕП-М"* притежава следните параметри:

- пропускане на обектива $\tau_{ob} = 0.8$
- диаметър на входната зеница $D_{in} = 20 \text{ mm}$
- увеличение = 1
- възможност за използване на различни поколения и различни технологии ЕОП: (SHD-3TM, XD-4TM, XR5TM и др.).

Външният вид на използвания тестови уред има вида, показан на Фиг. 3.3.



Фиг. 3.3. Нощен монокуляр *"ПРИЛЕП-М"*

При провеждане на експериментите за определяне на разстояние на действие при изменение на температурата, са използвани следните технически средства и апаратура:

- Дву лъчев осцилограф „Тектроникс 465В”
- Токозахранващо устройство Hewlett Packard 622B DUAL POWER SUPPLY
- Токозахранващо устройство TEKTRONIX FS503A DUAL POWER SUPPLY
- Цифров мултиметр TEKTRONIX DM501A
- Аналогов мултиметър UNIGOR A43
- Автотрансформатор тип „ЛАТР1”0-240-9А
- Електростатичен киловолтметър тип С-196
- Лампа с нажежаема волфрамова жичка 100W
- Лабораторен живачен термометър обхват 0-100°C точност 1°C
- Оптични мири върху хартиен носител стандарт USAF-1951, (фиг. 3.5.)
- Монокуляр за нощно виждане със сменяеми обективи ПРИЛЕП-М

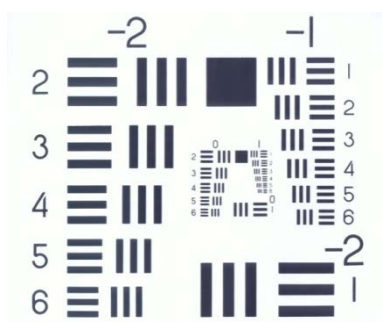
Така описаната апаратура има достатъчно висок клас на точност за целите на експерименталните изследвания.

Общата експериментална постановка и част от използваната апаратура са показани на Фиг. 3.4.



Фиг. 3.4. Опитна установка на част от използвана апаратура

Използваните оптични мири за провеждане на експериментите са от тип USAF-1951, както е показано на Фиг. 3.5 (Resolving Power Target, MIL-STD-150A)



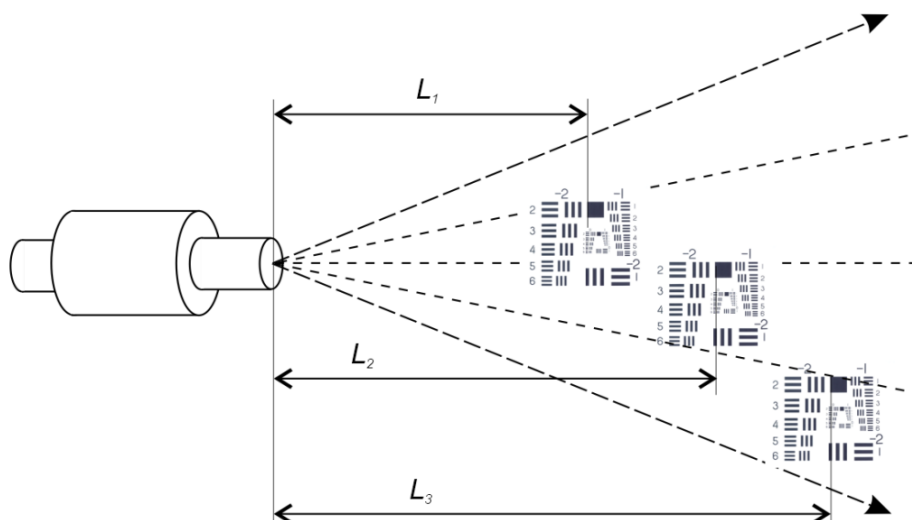
Фиг. 3.5. Мири USAF-1951

3.1.2. Описание на опитната постановка

На първия етап на експериментите, в зрителното поле на уреда за нощно виждане се наблюдават едновременно три еднакви мири, които са подредени една след друга на различни разстояния от обектива на уреда и една до друга в зрителното поле на обектива. Визирната ос на всяка мира съдържа определен ъгъл спрямо централната оптична ос на обектива, както е показано на Фиг. 3.6.

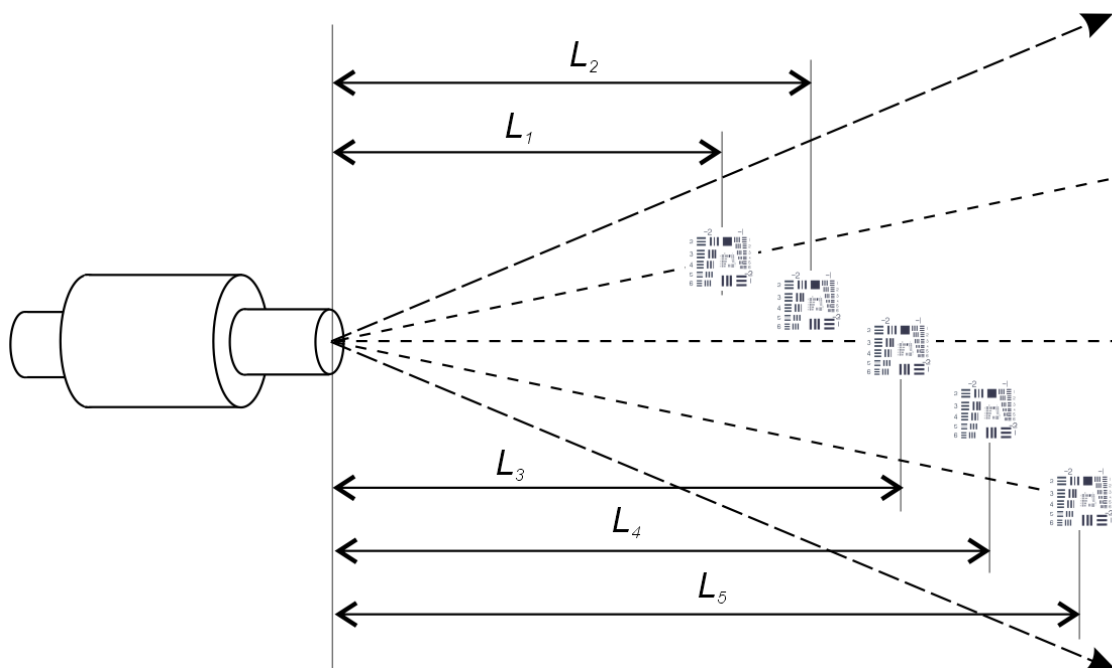
Разстоянията до трите мири са различни и са избрани така, че да се получават лесно проверими резултати от измерванията. Разстоянието L_1 представлява разстоянието от центъра на обектива на УНВ до първата мира (M1), L_2 е разстоянието

от центъра на обектива на УНВ до втората мира (M2), а L_3 е разстоянието от центъра на обектива на УНВ до третата мира (M3).



Фиг.3.6. Разположение на мирите в зрителното поле
 $L_1 = 2.5 \text{ m}$; $L_2 = 3.75 \text{ m}$; $L_3 = 5.0 \text{ m}$

На Фиг. 3.7. е показано разположението на 5 мири в експерименталната постановка за втория етап на изследвания и съответните разстояния.



Фиг. 3.7. Разположение на мирите в зрителното поле
 $L_1 = 3 \text{ m}$; $L_2 = 3.5 \text{ m}$; $L_3 = 4.0 \text{ m}$; $L_4 = 4.5 \text{ m}$; $L_5 = 5.0 \text{ m}$

На Фиг. 3.8. е показана снимка през УНВ ПРИЛЕП-М и разположението на наблюдаваните три мири при ниски нива на осветеност (а) и снимка на опитната постановка при нормални условия (б). Разположението на мирите позволява бързо и лесно да се оценят получените резултатите.



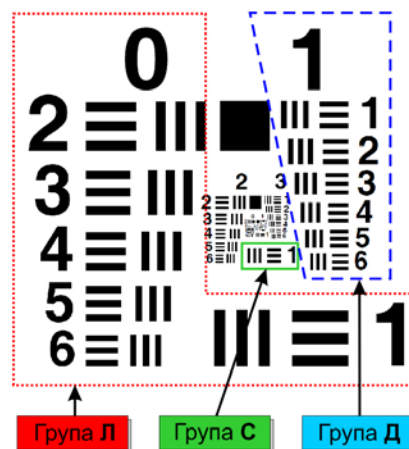
Фиг. 3.8. Наблюдаване на разположените 3 мири със и без уред

На Фиг. 3.9. е показана снимка през УНВ ПРИЛЕП-М и разположението на наблюдаваните пет мири при ниски нива на осветеност (а) и реална снимка (б) на опитната постановка.



Фиг. 3.9. Наблюдаване на разположените 5 мири със и без уред

На Фиг. 3.10 са показани елементите от оптичната мира, които са използвани при експерименталните изследвания (USAF):



Фиг.3.10. Групи елементи на мирата

В група Л са обединени елементите от едно до шест – заградените с червена разграничителна линия (Фиг. 3.10). Елементите в група Л са с ниска пространствена честота. В група Д са обединени елементите от едно до шест – заградените със синя разграничителна линия (Фиг. 3.10). Пространствената честота на елементите в група Д е по-висока от пространствената честота на елементите от група Л. В група С присъства един елемент, очертан в зелена контурна линия (Фиг. 3.10), който е с най-висока пространствена честота в сравнение с група Л и група Д.

3.1.3. Описание на разработен високоволтов импулсен преобразовател на напрежение за електронно-оптичен преобразувател

За целите на експерименталното изследване е използван ЕОП на DEP, технология **XD-4TM**, произведен през 2003 г. Закупени са два ЕОП, които са използвани за военно-полеви и лабораторни изпитания на ОНВ Прилеп (Borissova и др., 2001). След успешно проведени изпитания за приемане на въоръжение в Българската армия са произведени 18 броя ОНВ (Илиев и др, 2002) с ЕОП технология SHD-3, които са доставени на специалните подразделения на сухопътните войски на БА.

На по-късен етап и двата ЕОП от технология **XD-4TM** показват един и същ фабричен дефект. Настъпва електрически пробив във високоволтовата част на електронния преобразувател на напрежение. Изследванията показват, че това се случва, когато уредът се остави включен и работи продължително време в условията на пълна тъмнина, например с поставени капачки на обективите. Хипотезата е, че електрическият потенциал приложен между изхода на МКП и екрана се увеличава над допустимите стойности, които високоволтовият изолационен компаунд е в състояние да издържи.

Външният вид на опто електронния канал на изследвания прототип, в който е интегриран ЕОП второ поколение (технология XD-4TM, тип XX2040) е показан на Фиг. 3.11.



Фиг. 3.11. Външен вид на оптоелектронния канал на изследвания прототип

Според заводската спецификация на холандската фирма DEP, техническите характеристики на този ЕОП от второ поколение са:

- Разделителна способност: минимална стойност 60 lp/mm
- Модулационно трансферна функция
 - 2.5 lp/mm 92-88 %
 - 7.5 lp/mm 80-72 %
 - 15 lp/mm 64-54 %
 - 25 lp/mm 45-40 %
 - 30 lp/mm 35-30 %
- Отношение сигнал/шум при (@108 lx): минимална стойност 20.
- Усилване при $2 \times 10^{-6}(fc)$: минимална стойност 28000
- Време на живот: минимална стойност 10000 часа.
- Максимална изходна яркост (МОВ): средна стойност 6 cd/m^2
- Еквивалентна фонова осветеност (ЕФО): минимална стойност 0.15 μlx
- Интегрална чувствителност при 2850 $^{\circ}K$: минимална стойност 600 $\mu A/lm$
- Спектрална чувствителност при 800 (nm): минимална стойност 50 mA/W
при 850 (nm): минимална стойност 40 mA/W
- Устойчивост на удари: минимална стойност 500 $g\ m/s^2$
- Захранващо напрежение оптимална стойност: 2.7 V
- Консумация на ток: минимална стойност: 16 mA
- Работен температурен диапазон: от -45 $^{\circ}C$, до +52 $^{\circ}C$
- Гранични температури на съхранение: от -52 $^{\circ}C$ до +65 $^{\circ}C$

Така описаният ЕОП от поколение супер 2+ притежава мултиалкален фотокатод ЕС23 и микроканална пластина ($\Phi = 18\ mm$) с работен диаметър от 17.5 mm и луминисцентен екран тип P33 с работен диаметър от 18 mm.

За нормалната работа на електронно-оптичния преобразувател са необходими и реализирани три захранващи напрежения (Patent EP 0033574 A1, 1981; High-Voltage-Power-Supplies, Proxivision, 2003):

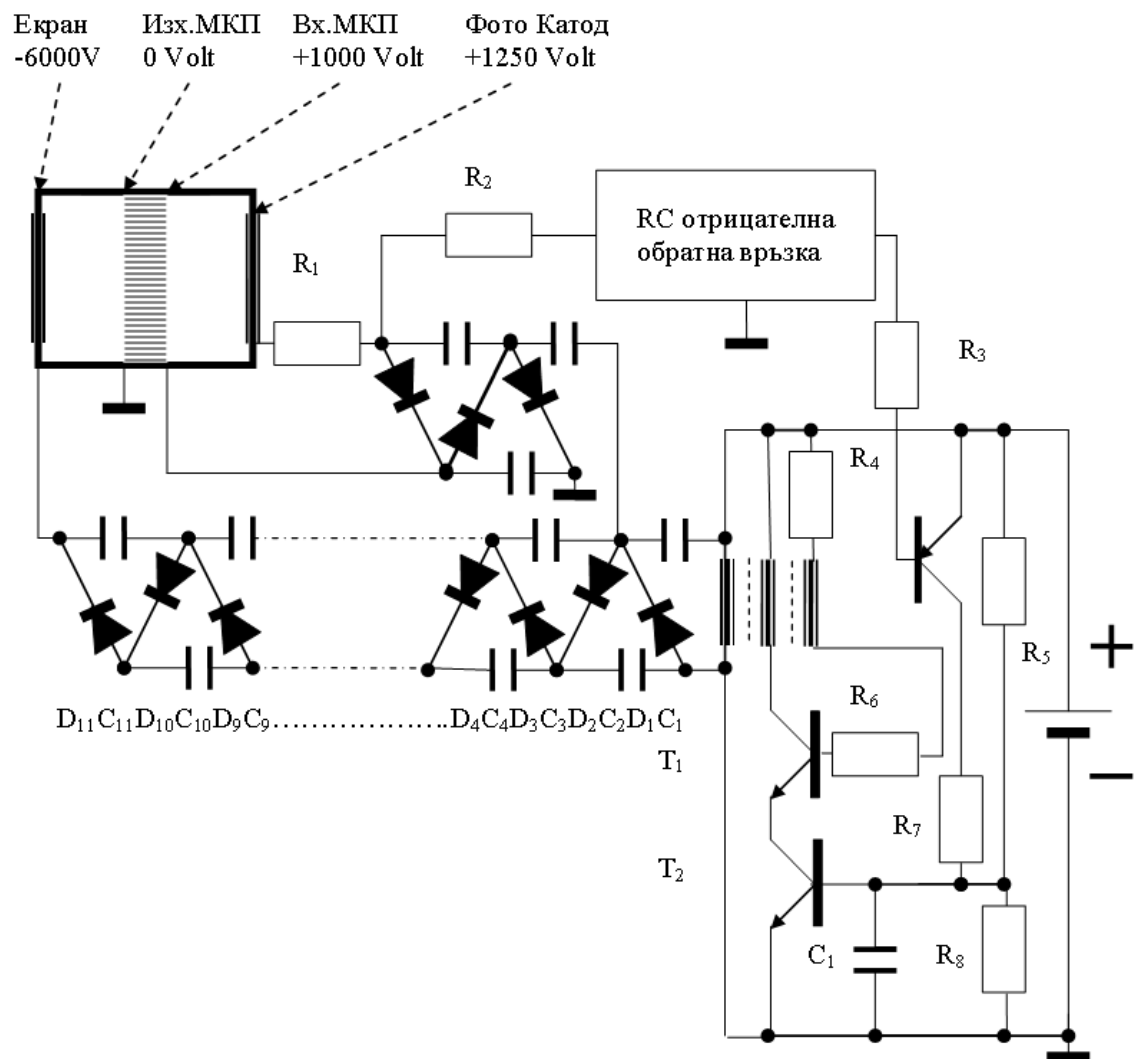
- от 5000 до 6000 волта, в зависимост от конкретните геометрични размери на ЕОП, които се прилагат галванично между екрана и изход на микроканалната пластина,
- от 800 до 1100 волта, които се прилагат между входа и изхода на микроканалната. Конкретната стойност на напрежението се подбира в зависимост от необходимото усилване и индивидуалните електрически параметри на микроканалната пластина,
- от 180 до 200 волта, които се прилагат между фотокатода и входа на микроканалната пластина. Конкретната стойност се подбира в зависимост от необходимото усилване, необходимият шумов фактор и необходимото прагово ниво на отношение сигнал/шум.

Измерването и настройката на необходимите напрежения се извършва с помощта на електростатичен киловолтметър тип С-196 (Фиг. 3.12).



Фиг. 3.12. Електростатичен киловолтметър тип С-196

Описаните електрически напрежения се получават чрез високоволтovo малобааритно токозахранващо устройство, което е специално разработено за целите на научното изследване, по схема е показана на Фиг. 3.13.



Фиг.3.13. Ел. схема на високоволтов електрозахранващ преобразувател

В колектора на транзистора $T1$ е включена първичната намотка на малогабаритен феритен трансформатор, тип топфкерн (чашковиден ферит). Намотката се състои от 8 навивки емайлиран едножилен проводник с диаметър $\Phi = 0.12 \text{ mm}$. Би-филярно (еднослойно-успоредно) на първичната намотка е навита вторична, състояща се от 8 навивки меден емайлиран едножилен проводник с диаметър $\Phi = 0.1 \text{ mm}$. Горещият край на вторичната намотка е свързан чрез резистор R_1 (15 ком) към базата на транзистора $T1$. По този начин се осъществява положителна обратна връзка, в резултат на което се генерират синусоидални колебания. Третата намотка на феритният трансформатор се състои от 3500 намотки, едножилен емайлиран проводник с диаметър $\Phi = 0.03 \text{ mm}$.

Необходимото постоянно токово напрежение от 6 волта се осигурява от токозахранващо устройство Hewlett Packard 622B DUAL POWER SUPPLY, както е показано на Фиг. 3.14.



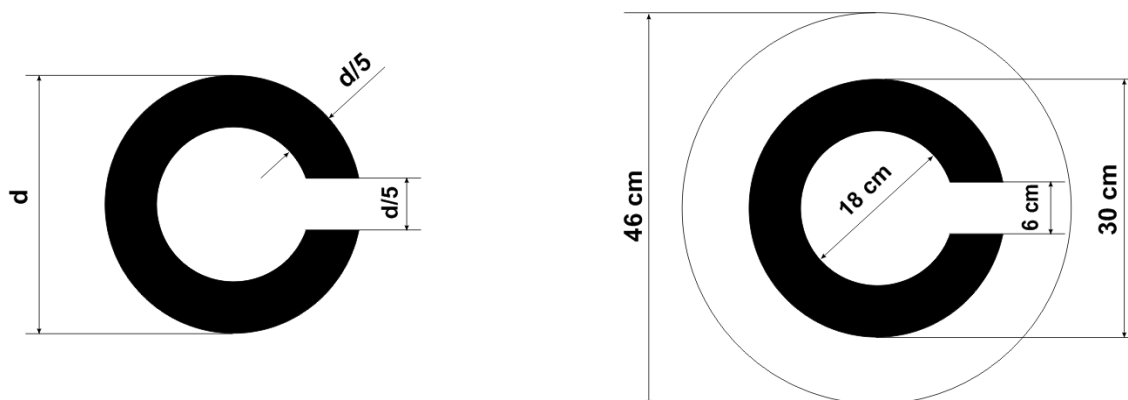
Фиг. 3.14. Токозахранващо устройство Hewlett Packard 622B DUAL POWER SUPPLY

3.1.4. Измерване на осветеност. Кръг на Ландолт

Експерименталните измервания са проведени в лабораторни условия в помещение със затъмнени прозорци. Измереното ниво на осветеност с помощта на кръга на Ландолт е 10^{-7} lx . Методът на това измерване е субективен, но достатъчно точен за целите на експеримента. Групата на наблюдателите, определящи ориентацията на кръга на Ландолт, се състои от мъже и жени на различна възраст. Измерванията са извършени многократно и в различни часове на денонощието, като средностатистически резултатите се потвърждават.

Измерванията с кръга на Ландолт са проведени съгласно методика и програма за изпитание на очила за нощно виждане изделие „Прилеп”. Методиката и програмата са съгласувани със специалисти от Министерство на отбраната на РБ и са утвърдени от министъра на отбраната на РБ. Процедурата на измерването съответства на БДС и отговарят на изискванията на руският военен стандарт „Мороз”, група Н14, която се отнася за изпитания на мобилни електронно-оптични и оптично-механични военни изделия. Съгласно приетия и утвърден стандарт ISO 8596 – “Оптика и оптически

уреди”, съществуват определени съотношения между външния и вътрешния диаметър за кръга на Ландолт, както и за неговия отвор, както е показано на Фиг. 3.15.



Фиг. 3.15. Размери на кръга на Ландолт

Използваните геометрични съотношения, съгласно стандарта, са получени чрез условието:

$$(3.1) \quad D_{out} \geq d_{in} + \frac{2d_{in}}{5}$$

При измерване с кръгът на Ландолт, осветеността е равна на 10^{-4} lx , когато разстоянието между наблюдателя и кръга е в интервала (8-10) *m* и когато наблюдателят вече не е в състояние да определи ориентацията на кръга (положението на светлата част от незатворения кръг). Осветеността е равна на 10^{-5} lx , когато разстоянието между наблюдателя и кръга на Ландолт е в интервала 5 - 8 *m* и когато наблюдателя не е в състояние да определи ориентацията на кръга.

Проведените експерименти са с уред с оптично увеличение равно на единица. Входящият светъл отвор на обектива е с диаметър $D = 20 \text{ mm}$, като на входа на обектива е поставена бленда с диаметър $D = 1 \text{ mm}$. По този начин се постигат достатъчно ниски нива на постъпващия на входа полезен светлинен сигнал, който е необходим за целите на изследването.

Отношението на площта на блендата към площта на входящия светъл отвор представлява коефициента на затихване на светлинния поток. Площта на блендата (S_{bl}) е равна на:

$$(3.2) \quad S_{bl} = 3,14.r^2 = 3,14.0,5^2 = 0,78 \text{ mm}^2$$

Площта на входния отвор на обектива (S_{ob}) е:

$$(3.3) \quad S_{ob} = 3,14.r^2 = 3,14.100 = 314 \text{ mm}^2$$

Затихването (Z_{at}) е равно на:

$$(3.4) \quad Z_{at} = 314/0,78 = 402,5 \text{ пъти}$$

Следователно:

$$(3.5) \quad S_{екв} = S/402,5$$

Това означава, че еквивалентната осветеност е 402 пъти по-малка от осветеността, измерена с кръга на Ландолт.

3.1.5. Описание на използваната термична камера

За да се симулира повишаване на температурата на УНВ с повишаване на температурата на околната среда уредът се поставя в термична камера, изработена от пенополиуретан с дебелина на стените 2 cm. Камерата е с размери: височина от 210 mm; ширина 140 mm и дължина 210 mm и в нея се поставя съответен електрически нагревател и термометър. Външният вид на термичната камера, използвана при експериментите, е показан на Фиг. 3.16.



Фиг. 3.16. Външен вид на термична камера с термометър

Върху два срещуположни отвора на термичната камера са пробити подходящи отвори, така че през тях да се показва окуляра и обектива на нощния уред, както е показано на Фиг. 3.17.



Фиг. 3.17. Термична с УНВ Прилеп М

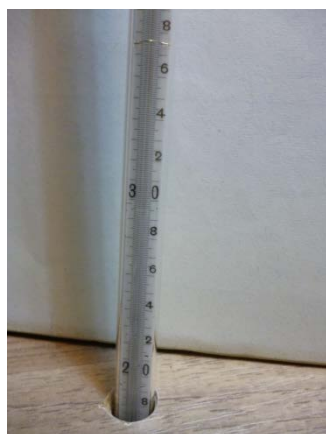
По този начин е възможно да бъдат проведени експериментите, включително необходимото наблюдение през уреда, както и да се правят оптични корекции и

механични настройки. На дъното на термичната камера е поставен нагревател със съпротивление 100 ома. За изработката на нагревателя е използван съпротивителен проводник от кантал, с диаметър на проводника $D = 0.3 \text{ mm}$. Общата дължина на проводника е 1.5 m и е навит върху Х-образен носач, изработен от изкуствена слюда, показан на Фиг. 3.18.



Фиг. 3.18. Термична с нагревател

Непосредствено над нагревателя се поставя нощният уред за провеждане на експерименталните изследвания. По този начин се осигурява достатъчно добра конвекция на нагретият въздух, който се движи вертикално от нагревателя към нощният уред. Целта е постигане на термодинамично равновесие между произвежданото количество топлина и топлината, която напуска термичната камера. В този случай, температурата на въздуха в затвореният обем остава постоянна величина. Промените на температурата и установяването на термодинамичното равновесие се измерват с помощта на лабораторен живачен термометър. Снимка на опитната постановка е показана на Фиг. 3.19.



Фиг. 3.19. Термична камера с термометър

Термометърът позволява измерване на температура в границите от 0 до 100 градуса Целзий с точност от 1 градус. Върху нагревателя се прилага постоянно напрежение от стабилизирани източник с възможност за регулиране от 0 до 25 волта.

3.1.6. Метод за установяване на температурата

Необходимите захранващи напрежения за целите на провежданите измервания се установяват експериментално. Така например, при захранващо напрежение равно на 10 V, приложено върху нагревателя, и околна външна температура равна на 19 - 20 градуса по Целзий, температурата в камерата се покачва до 25 градуса по Целзий. При тази температура се установява термодинамично равновесие, като експериментите показват, че това се случва два часа след прилагането на напрежението върху нагревателя. При захранващо напрежение равно на 12 V и околна външна температура, равна на 19 - 20 градуса по Целзий, температурата в камерата се покачва до 33 градуса по Целзий. При тази температура се установява термодинамично равновесие след три часа. При промяна на захранващо напрежение от 12 V на 14 V и околна външна температура равна на 19 - 20 градуса по Целзий, температурата в камерата се покачва от 33 градуса по Целзий до 44 градуса по Целзий. При тази температура се установява термодинамично равновесие след три часа.

По този начин е определена функционалната зависимост между захранващото електрическо напрежение, приложено върху нагревателя, и топлинната инертност на термичната камера. Зависимостта между приложеното напрежение и температурата на термодинамично равновесие, необходима за провеждането на изследването, е показана в Таблица 3.1.

Табл.3.1 Ел. напрежение, температура и време за достигане на термодинамично равновесие

Захранващо напрежение, V	Температура, °C	Време за достигане на термодинамично равновесие (час и минути)
0	19 → 22	24 часа (стайна температура)
0 → 9.7	20 → 28	35 минути
0 → 12.0	20 → 33	1 час
0 → 15.0	20 → 38	1 час и 20 минути
0 → 17.0	20 → 44	1 час и 50 минути
0 → 19.0	20 → 49	2 часа и 25 минути

В посочените случаи, началната стайна температура е равна на 20 °C, което означава че в началния момент на измерване на температура, върху нагревателя не е приложено захранващо напрежение.

В таблица 3.2 са показани стойностите на приложени последователно нарастващи захранващи напрежения и постигнатите нарастващи температури на термодинамично равновесие, както и времето за постигане на термодинамично равновесие.

Табл.3.2. Ел. напрежение, температура и време за достигане на термодинамично равновесие

Захранващо напрежение, V	Температура, °C	Време за достигане на термодинамично равновесие (час и минути)
0	19 → 22	24 часа (стайна температура)
0 → 9.7	20 → 28	35 минути
7,5 → 12.0	28 → 33	25 минути
10.0 → 15.0	33 → 38	28 минути
12.0 → 17.0	38 → 44	35 минути
14.0 → 19.0	47 → 49	40 минути

В посочените случаи, началната температура е вече постигната и е в състояние на термодинамично равновесие, което означава че напрежението върху нагревателя се изменя стъпаловидно с повишаващи се стойности, както е показано в Таблица 3.2.

3.2. Резултати от експериментално измерване на разстоянието на действие на УНВ ПРИЛЕП-М

Първоначално, за провеждането на експерименталните изследвания бе предвидено използването на три мири, разположени на различно разстояние една от друга. В процеса на изследване бе установено, че ефектът на намаляване на разстоянието да действие на УНВ с повишаване на температурата се забелязва при ниски нива на осветеност. Това наложи добавянето на още 2 мири в експерименталната постановка, с цел по-прецизно определяне на зависимостта на разстоянието на действие от температурата. Поради това описаните по-долу резултати са групирани на резултати от използване на 3 мири и резултати от използване на 5 мири.

3.2.1. Резултати от измервания, проведени с три мири

За получаването на тези резултати е използвана опитната постановка с три мири, показана на Фиг. 3.8. Целта на експеримента е установяване на разстоянието на действие в зависимост от увеличаване на температурата при различни осветености. Измерванията са проведени в продължение на 28 работни дни, в различни части на денонощието. Общият брой на получените резултати от измервания с три мири, може да бъде структуриран в 56 различни таблици, съгласно проведените измервания. Измерванията, извършени на определена дата се представят в две таблици. Отчетени са характерните особености на наблюдението, свързани с психологически настроения и физиологически състояния на субекта, които оказват влияние върху експериментите и резултатите на този тип оптически измервания. Например, при една и съща осветеност на наблюдавания обект, но в различни части на денонощието (сутрин, след обяд или късно вечер), в резултат на настъпила умора в наблюдателя, близките по

стойност показания търпят отклонения, които достигат до 10 %. При обработката на резултатите тези обстоятелства са взети предвид. Общото количество на единичните измервания, при които е получен конкретен актуален резултат е 3024.

В Таблица 3.3 и Таблица 3.4 са представени резултатите от измерванията, проведени на 12.02.2014 г. Измерванията започват в 12 часа и 17 минути и приключват в 23 часа и 07 минути. Първата група резултати са получени в условията на стайна температура, отчетена по показанията на термометъра $T = 20.5^{\circ}\text{C}$. Нощният уред е темпериран и температурата на фотокатода е равна на стайната. С M1, M2 и M3 са означени трите мири, намиращи се на разстояния $R_1 = 2.5\text{ m}$, $R_2 = 3.75\text{ m}$ и $R_3 = 5\text{ m}$ съответно. В 12 часа и 49 минути е включен нагревателя на термичната камера като върху него е приложено напрежение от 10 V. В 14 часа и 35 минути температурата на камерата се е повишила до 28°C в състояние на термодинамично равновесие. Втората група измервания показани в Таблица 3.3 започват в 14 часа и 35 минути и приключват в 15 часа и 11 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение равно на 12 V. В 16 часа и 56 минути температурата на камерата се е повишила до 32°C в състояние на термодинамично равновесие.

Таблица 3.3. Резултати от измерванията проведени на 12.02.2014

12.02.2014		12 : 17 T = 20.5 °C			14 : 35 T = 28 °C			16 : 56 T = 32 °C		
No	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30	01л	-	-	01л	-	-	01л-	-	-
2	40	04л	01л	-	04л	01л	-	04л	01л	-
3	50	06л	04л	-	06л	04л	-	06л	03л	-
4	60	11д	05л	03л	11д	05л	03л	11д	05л	02л
5	70	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	04л
6	80	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	04л
7	90	14д	11д	05л	14д	11д	05л	14д	11д	05л
8	100	15д	12д	05л	15д	12д	05л	15д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	16д	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
16	180	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		12:49 при 10V			15:11при12 V			17:28 при 15 V		

Третата група измервания показани в Таблица 3.3 започват в 16 часа и 56 минути и приключват в 17 ч. и 28 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение равно на 15 волта. В 18 часа и 55 минути, температурата на камерата се е повишила до 37.5°C , в състояние на термодинамично равновесие, както е показано в Таблица 3.4.

Таблица 3.4. Резултати от измерванията проведени на 12.02.2014

12.02.2014		18:55 T°C=37.5			20:42мин T°C=42			22:35мин T°C=49		
№	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30	01л	-	-	01л	-	-	-	-	-
2	40	04л	01л	-	03л	-	-	03л	-	-
3	50	11д	03л	-	11д	02л	-	11л	02л	-
4	60	11д	04л	02л	11д	04л	02л	11д	04л	01л
5	70	13д	05л	03л	13д	05л	03л	13д	05л	02л
6	80	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	03л
7	90	14д	11д	04л	14д	11д	04л	14д	11д	04л
8	100	15д	12д	05л	15д	12д	05л	15д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	16д	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
16	180	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		19:21при17 V			21:14 при 19 V			23:07 при 19 V.		

Четвъртата група измервания, показани в Таблица 3.4 започват в 18 часа и 55 минути и приключват в 19 часа и 21 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение от 17 V. В 20 часа и 42 минути температурата на камерата се е повишила до 42 °C в състояние на термодинамично равновесие. Петата група измервания показани, в Таблица 3.4 започват в 20 часа и 42 минути и приключват в 21 часа и 14 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение равно на 19 V. В 22 часа и 35 минути температурата на камерата се е повишила до 49 °C в състояние на термодинамично равновесие. Шестата група измервания показани в Таблица 3.10 започват в 22 часа и 35 минути и приключват в 23 часа и 07 минути, при температура на камерата 48.5 °C.

В Таблица 3.5 и Таблица 3.6 са представени резултатите от измерванията извършени на 14.02.2014 г. с три мири. Измерванията започват в 09 часа и 17 минути и приключват в 19 часа и 14 минути.

Таблица 3.5. Резултати от 14.02.2014

14.02.2014		9 :17 T°C=20,5			11:05 T°C=28			12:56 T°C=33		
No	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30	01л	-	-	01л	-	-	-	-	-
2	40	04л	01л	-	04л	01л	-	04л	01л	-
3	50	06л	04л	-	06л	04л	-	06д	03л	-
4	60	11д	05л	03л	11д	05л	03л	11д	05л	03л
5	70	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	03л
6	80	14д	06л	04л	14д	06л	04л	14д	06л	04л
7	90	15д	11д	05л	15д	11д	05л	15д	11д	05л
8	100	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	13д	06л	21с	13д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	21с	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
16	180	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		9:35 при 10 V			11:21при 12 V			13:21 при 15 V		

Първата група резултати са получени в условията на стайна температура, отчетена по показанията на термометъра $T = 20.5^{\circ}\text{C}$. Нощният уред е темперирен и температурата на фотокатода е равна на стайната. В 9 часа и 35 минути е включен нагревателя на термичната камера и върху него е приложено напрежение равно на 10 V. В 11 часа и 5 минути температурата на камерата се е повишила до 28°C в състояние на термодинамично равновесие. Втората група измервания показани в Таблица 3.5 започват в 11 часа и 5 минути и приключват в 11 часа и 21 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение от 12 V. В 12 часа и 56 минути температурата на камерата се е повишила до 33°C в състояние на термодинамично равновесие. Третата група измервания показани в Таблица 3.5 започват в 12 часа и 56 минути и приключват в 13 ч. 21 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение равно на 15 V. В 14 часа и 55 минути, температурата на камерата се е повишила до 37.5°C в състояние на термодинамично равновесие.

Четвъртата група измервания показани в Таблица 3.6 започват в 14 часа и 55 минути и приключват в 15 часа и 17 минути, когато върху нагревателят се прилага напрежение от 17 V. В 17 часа температурата на камерата се е повишила до 43°C в състояние на термодинамично равновесие.

Таблица 3.6. Резултати от 14.02.2014

14.02.2014.		14:55 T°C=37,5			17:00 T°C=43			18:55 T°C=49		
No	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30	01л	-	-	01л	-	-	-	-	-
2	40	04л	л	-	04л	л	-	03л	-	-
3	50	06л	02л	-	06л	02л	-	06л	02л	-
4	60	11д	05л	02л	11д	05л	02л	11д	05л	02л
5	70	13д	06л	03л	13д	06л	03л	13д	06л	03л
6	80	14д	06л	04л	14д	06л	04л	14д	06л	04л
7	90	15д	11д	05л	15д	11д	05л	15д	11д	05л
8	100	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	16д	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
16	180	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		15:17 при 17 V			17:17 при 19 V			19:14 при 19 V		

Петата група измервания показани в Таблица 3.6 започват в 17 часа и 00 минути и приключват в 17 часа и 17 минути, когато върху нагревателя се прилага напрежение, равно на 19 V. В 18 часа и 55 минути температурата на камерата се е повишила до 49 ° C в състояние на термодинамично равновесие. Шестата група измервания показани в Таблица 3.6 започват в 18 часа и 55 минути и приключват в 19 часа и 14 минути при температура на камерата 48.5° C.

В Таблица 3.7 и Таблица 3.8 са представени резултатите от измерванията извършени на 14.02.2014 г с три мири. Измерванията започват в 8 часа и 47 минути и приключват в 19 часа и 35 минути. Първата група резултати са получени в условията на стайна температура, отчетена по показанията на термометъра $T = 21^{\circ} \text{C}$. Нощният уред е temperиран и температурата на фотокатода е равна на стайната.

В 9 часа и 10 минути е включен нагревателя на термичната камера и върху него е приложено напрежение равно на 10 V. В 10 часа и 35 минути температурата на камерата се е повишила до 28 ° C в състояние на термодинамично равновесие. Втората група измервания показани в Таблица 3.7 започват в 10 часа и 35 минути и приключват в 10 часа и 49 минути, когато върху нагревателя се прилага напрежение от 12 V. В 12 часа и 21 минути температурата на камерата се е повишила до 33.5 ° C в състояние на термодинамично равновесие.

Третата група измервания показани в Таблица 3.7 започват в 12 часа и 21 минути и приключват в 12 ч. и 35 минути, когато върху нагревателя се прилага напрежение равно на 15 V. В 15 часа и 5 минути, температурата на камерата се е повишила до 37.5 ° C в състояние на термодинамично равновесие.

Таблица 3.7. резултати от 07.02.2014

07.03.2014.		8:47 T°C=21			10:35 T°C=28			12:21 T°C=33.5		
No	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30	01л	-	-		-	-	-	-	-
2	40	04л	01л	-	04л	01л	-	04л	01л	-
3	50	06л	03л	-	06л	03л	-	06л	02л	-
4	60	11д	05л	03л	11д	05л	03л	11д	05л	03л
5	70	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	04л
6	80	13д	06л	04л	13д	06л	04л	13д	06л	04л
7	90	15д	11д	05л	15д	11д	04л	15д	11д	04л
8	100	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	16д	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	14д	06л	21с	15д	11д	21с	14д	06л
16	180	22с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	22с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	22с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		9:10 при 10 V			10:49 при 12 V			12:35 при 15 V		

Четвъртата група измервания са показани в Таблица 3.8. Започват в 15 часа и 5 минути и приключват в 15 часа и 21 минути, когато върху нагревателя се прилага напрежение от 17 V.

Таблица 3.8. резултати от 07.02.2014

07.03.2014.		15:5 T°C=37.5			17:5 T°C=44			19:7 T°C=49		
No	V	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	30		-	-	-	-	-	-	-	-
2	40	03л		-	03л		-	03л	-	-
3	50	06л	02л	-	06л	02л	-	06л	02л	-
4	60	11д	04л	02л	11д	04л	02л	11д	04л	02л
5	70	13д	06л	03л	13д	06л	03л	13д	06л	03л
6	80	13д	06л	03л	13д	06л	03л	13д	06л	03л
7	90	15д	11д	04л	15д	11д	04л	15д	11д	04л
8	100	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
9	110	16д	12д	05л	16д	12д	05л	16д	12д	05л
10	120	16д	13д	06л	16д	13д	06л	16д	13д	06л
11	130	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
12	140	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
13	150	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
14	160	21с	14д	06л	21с	14д	06л	21с	14д	06л
15	170	21с	14д	06л	21с	15д	11д	21с	14д	06л
16	180	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
17	200	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
18	210	21с	15д	11д	21с	15д	11д	21с	15д	11д
		15:21 при 17 V			17:28 при 19 V			19:21 T°C=48, 5		

В 17 часа и 5 минути температурата на камерата се е повишила до 44 ° C, в състояние на термодинамично равновесие. Петата група измервания, показани в Таблица 3.8 започват в 17 часа и 5 минути и приключват в 17 часа и 28 минути, когато

върху нагревателят се прилага напрежение равно на 19 V. В 19 часа и 7 минути температурата на камерата се е повишила до 49 °C в състояние на термодинамично равновесие. Шестата група измервания, показани в Таблица 3.8 започват в 19 часа и 7 минути и приключват в 19 часа и 21 минути при температура на камерата 48.5 °C.

3.2.2. Анализ на резултатите от извършените експерименти с три мири

Експериментите са проведени, спазвайки определена последователност която има за цел подготовката на ЕОПа за извършване на експеримента. Уредът се изключва в 17 часа, когато приключили експериментите, които са започнали в 9 часа на същият ден. На следващият ден сутринта в 9 часа уредът се включва и веднага се извършва наблюдение на трите мири и резултатите се записват. Нагревателят на термичната камерата не работи и експеримента се извършва в условията на стайна температура. Осветлението в лаборатория е изключено и уредът се оставя да работи на тъмно след отчитане на резултатите. Тридесет минути по-късно наблюдението върху трите мири се повтаря и резултатите се записват. Уредът се оставя включен на тъмно, нагревателят е изключен при стайна температура. Тридесет минути по-късно отново, се извършва наблюдение за трети път и резултатите се записват. Уредът се оставя включен на тъмно, нагревателят е изключен при стайна температура. Тридесет минути по-късно се извършва четвърто наблюдение и резултатите се записват.

Оформят се четири групи резултати, които са получени в условията на постоянна стайна температура, и които са разделени във времето с период от 30 минути. Забелязва се, че резултатите от първото, второто и третото измерване са различни, като първите два са по-лоши, третият и четвъртият по-добри. Резултатите от трета и четвърто измерване са съизмерими. Това показва, че възможността за разпознаване на разстояние са по-ниски в момента на започване на работа на уреда, в сравнение с възможността за разпознаване, когато уредът е работил в продължение на 30 – 40 минути, в условията на постоянна стайна температура. Най-вероятно, мултиалкалният фотокатод на ЕОП притежава инертност по отношение на моментната стойност на величината на интегралната чувствителност. Общото правило е, че интегралната чувствителност нараства във времето, веднага след началното включване на уреда за нощно виждане. Анализ на усреднените резултати показва, че при в условията на стайна температура чувствителността на уреда престава да се увеличава от 30 до 40 минути след началното включване на електрозахранването. Наличието на този експериментално установен факт изисква конкретен метод, определящ спазването на необходима последователност за провеждане на верни експерименти.

От получените резултатите се забелязват три закономерности:

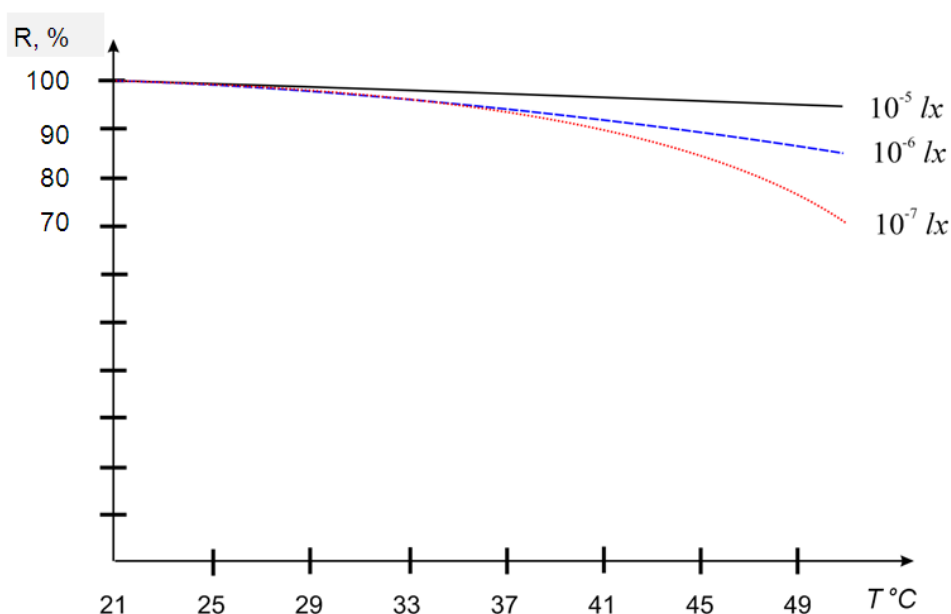
- с увеличаване на осветеността, при една и съща температура, разстоянието на действие се увеличава.
- с увеличаване на температурата, разстоянието на действие намалява.

Тези две закономерности, са в сила за всички извършени измервания и са представени в първите четири реда на всяка таблица. Трети тип закономерност се забелязва при следващата стъпка на нарастващата осветеност, която е представена в пети ред на всяка таблица.

- резултатите се запазват постоянни до достигана на максималните нива на осветеност.

Тези три закономерности, без изключения, са в сила за всички извършени измервания.

Получените резултати са очаквани в съответствие с теоретичния анализ. Съществува ниво на осветеност, при която входящият полезен светлинен сигнал е десетки и стотици пъти по силен от топлините шумове на фотокатода. Това е прагово ниво на осветеност при което увеличението на температурата не оказва влияние върху разстоянието на действие. От теоретична гледна точка явлението е напълно предсказуемо, и се нарича „режим на работа при висока осветеност”. На Фиг. 3.20 е показано как се изменя разстоянието на действие (в проценти) при повишаване на температурата за три различни нива на осветеност, използвайки описаната постановка на Фиг. 3.8 с три мири.



Фиг. 3.20. Зависимост на разстоянието на действие на уреда от температурата

Анализът на резултатите от извършените експерименти с три мири показва необходимост от детайлно изследването на намаляването на разстоянието на действие, при увеличаване на температурата, когато електронно оптичният преобразувател е в режим на работа при ниски нива на постоянна осветеност, от порядъка на 10^{-7} lx.

3.2.3. Резултати от измервания, проведени с пет мири

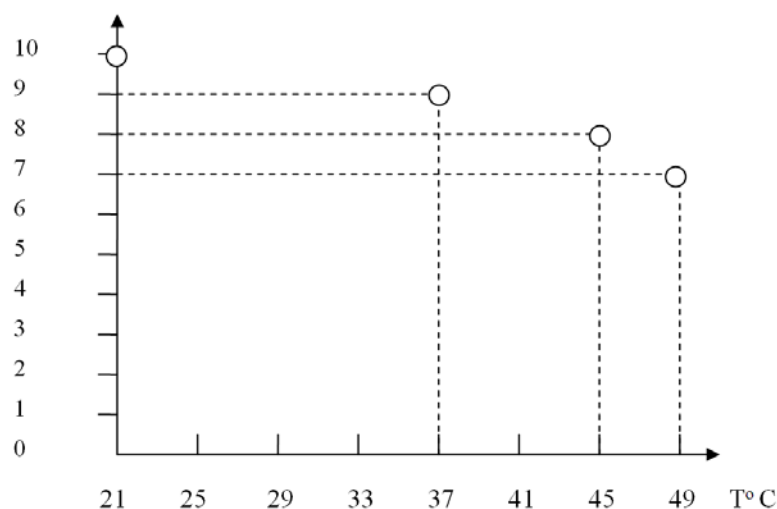
За изчисляване на температурно зависимия коефициент при гранично ниски нива на осветеност, се използват пет мири, разположени по подходящ начин. За целта е реализирана опитната постановка от Фиг. 3.6, където са показани мирите и тяхното разположение спрямо УНВ. Мира 5 се намира на разстояние 5 метра от фокалната равнина на обектива на уреда. Останалите четири мири са разположени една от друга на разстояние 0.5 метра. По този начин, в низходящ ред, всяка следваща мира се намира на разстояние, което е с 10% по-близо до уреда. Наблюдението се извършва върху един и същ елемент, който се намира върху различно отдалечените мири. При провеждане на експериментите се регистрира намаляването на разстоянието на действие с повишаване на температурата.

В Таблица 3.9 са показани експерименталните резултати на зависимостите между температура, пореден номер на мира, в която се наблюдава предварително определен елемент и процентното намаляване разстоянието на действие.

Таблица 3.9. Зависимост му температура и наблюдаван елемент.

Температура Мири	21	25	29	33	37	41	45	49
M1	X	X	X	X	X	X	X	X
M2	X	X	X	X	X	X	X	X
M3	X	X	X	X	X	X	X	O
M4	X	X	X	X	X	X	O	O
M5	X	X	X	X	O	O	O	O
%	100	99	97	95	90	85	80	70

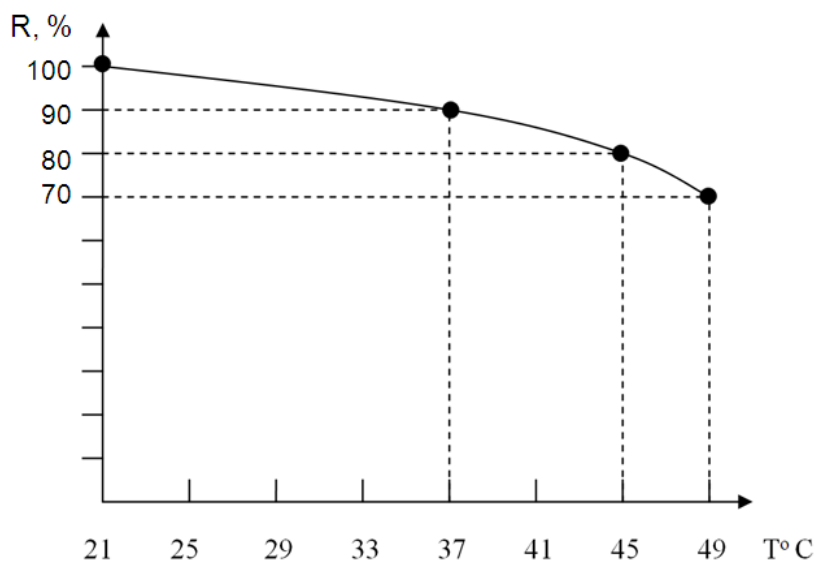
В първата колона от Таблица 3.9 са наблюдаваните мири. В първият ред са стойностите на нарастващата температура, със стъпка 4 градуса. В последният ред е процентното намаляване на разстоянието на действие. На Фиг. 3.21 е показано графично резултатите от експерименталното измерване разстоянието на действие при различни температури.



Фиг. 3.21. Намаляване разстояние на действие в % в зависимост от температурата

3.2.4. Анализ на резултатите от извършените експерименти с пет мири

На Фиг. 3.22 са показани в графичен вид апроксимираните резултати от експерименталното измерване на намаляването на разстоянието на действие в проценти, при различни температури.



Фиг. 3.22. Апроксимирани резултати от измервания при осветеност 10^{-7} лукса.

Формата на графиката показва че разстоянието намалява нелинейно с увеличение на температурата. Това се определя от начинът по който се увеличава токът на тъмно в зависимост от увеличение на температурата. Токът на тъмно се удвоява при увеличаване на температурата с стойност от 3 до 5 градуса. В общият случай зависимостта е експоненциална и представлява квадратична функция. Тези резултати се потвърждават от (Zhu, Yu-Feng; Zhang, 2013) и от (Bender и др, 2004).

От графиката се вижда че същественото намаляване на разстоянието на действие се наблюдава при температури по високи от +42 °С. Намаляването на разстоянието на действие в зависимост от температурата е в проценти, при стъпка на увеличение на температурата 4 градуса, в диапазона от +21 °С до +49 °С.

Анализът на резултатите от проведените експерименти показва, че функционалните характеристики на уредите за нощно виждане се променят при промяната на температурата на околната среда. Като общо правило се забелязва, че различните поколения електронно-оптични преобразуватели, използвани в уредите за нощно виждане, променят своите технически характеристики по различен начин. Електронно-оптичните преобразуватели от едно и също поколение, но произведени по различни технологии, имат различно отношение към промените на околната температура. Една от основните причини за това е токът на тъмно, който е различен за различните видове фотокатоли. Например, изменението на тока на тъмно с един порядък при мултиалкален фотокатод се причинява от нарастване на температурата с 20 - 25 °С, докато изменението на тока на тъмно с един порядък, при кислородно-цезиев сребърен фотокатод се причинява от нарастване на температурата с 10 - 15 °С.

Промените в параметрите на ЕОП, респективно в параметъра *разстояние на действие на нощния уред* в следствие на повишаване на температурата, се забелязва при ниски нива на осветеност на наблюдавания обект – това е т. нар. режим на работа при гранично ниска осветеност (в границите $10^{-6} - 10^{-7} \text{ lx}$). Когато осветеността на обекта нарасне достатъчно и превиши тези стойности, параметрите на ЕОП практически престават да зависят от температурата. Това е така нареченият режим на работа при високи нива на околна осветеност. В този случай, разстоянието на действие на уреда за нощно виждане, остава константа и не зависи от нарастването на температурата.

Вземайки предвид изведения математически израз (2.31), изразяващ зависимостта на разстоянието на действие от температурата, и получените експериментални резултати може да се обобщи, че изразът е валиден при ниски нива на осветеност от порядъка на $10^{-6} - 10^{-7} \text{ lx}$.

В резултат на проведените експерименти и обработените резултати се забелязва още едно явление. С повишаване на температурата, във високите стойности, между 40 и 50 °С, възможността за разпознаване на елементите на мирата намалява сравнително бавно. Тенденцията на това понижаване се запазва една и съща за температурния диапазон 30 - 40 °С. Тези факти не оправдават очакването, че при високите температури в диапазона 40 - 50 °С, възможността за разпознаване ще намалява рязко и ще има формата на много стръмна експонента. В тази връзка възниква въпросът на какво се дължи този ефект? Един от възможните отговори е, че с

повишаване на температурата, интегралната чувствителност на фотокатода нараства. Дали това е вярно, могат да покажат, лабораторни изследвания, за които се изисква специфично оборудване. Интересното е, че в литературата и заводските спецификации не се предлагат данни за съществуването или за не съществуването на зависимост между температурата и интегралната чувствителност на ЕОП. Този факт сам по себе си говори за необходимостта от подобно изследване, при което ще се получат резултати, представляващи интерес за специалистите, разработващи уреди за нощно виждане.

3.3. Определяне на функцията на изменение на температурния коефициент K_T чрез получените експерименталните резултати

Стойностите за K_T се изчисляват, като се използва получената формула (2.31) и експерименталните резултати от измерванията за разстоянието на действие. Получените резултати от изчисленията са показани в Таблица 3.10

Таблица 3.10. Стойности за K_T от експерименталните резултати

Температура, °C	21	25	29	33	37	41	45	49
K_T	1	0.99	0.97	0.94	0.9	0.86	0.80	0.70

Така получените резултати са използвани за апроксимиране на математически израз за функцията на изменение на K_T с нарастване на температурата. Получените експериментални графики позволяват да се определи аналитичната функция, по която се изменя коефициента K_T в зависимост от температурата по следния начин:

$$(3.6) \quad K_T = f(T) = \frac{T_{\min}}{T_{\min} + \frac{(T - T_{\min})^2}{2T_{\max}}}$$

където $T_{\min} = +21$ °C, е долна граница и $T_{\max} = +49$ °C, е горна граница на температурния диапазон.

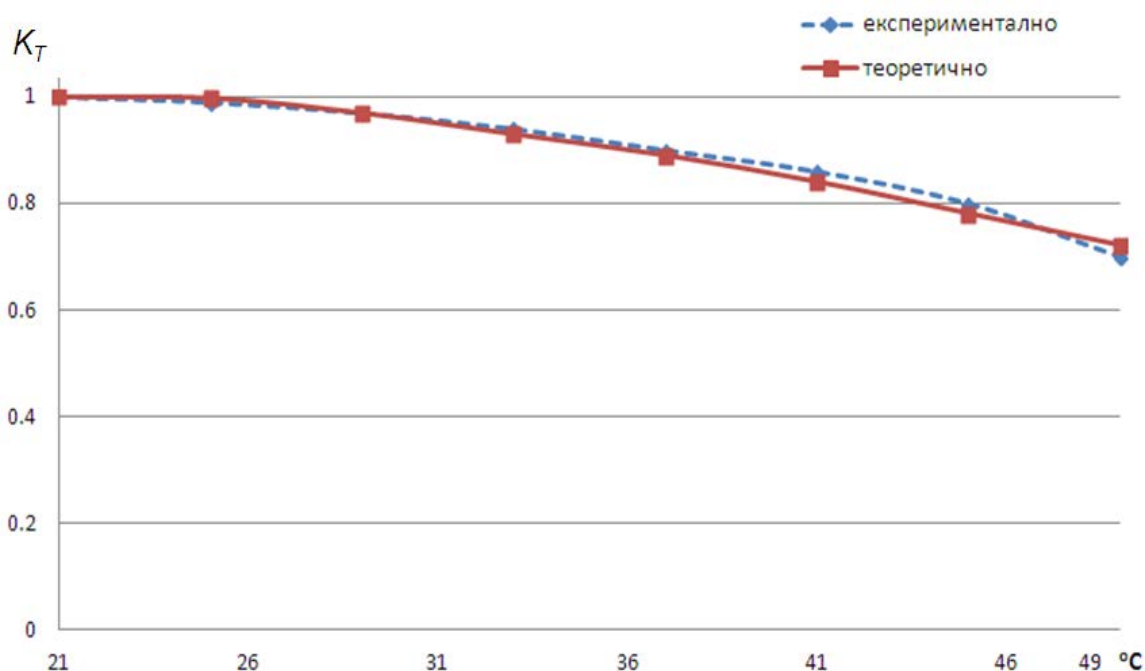
С така получения израз (3.6) за различни стойности на температурата получаваме следните теоретично изчислени стойности за температурния коефициент K_T , показани в Таблица 3.11.

Таблица 3.11. Получени теоретични стойности за K_T

Температура, °C	21	25	29	33	37	41	45	49
K_T	1	0.998	0.97	0.93	0.89	0.84	0.78	0.72

3.3.1. Сравнение на резултатите от експериментално определените стойности за температурния коефициент K_T с теоретично определените

За да сравним получената функция, по която се изменя коефициента K_T в зависимост от температурата, с получените експериментални резултати са построени съответните графики за тези резултати, както е показано на Фиг. 3.23.



Фиг. 3.23. Сравнение на теоретичните и експерименталните стойности на K_T

Червената непрекъсната крива описва получените теоретични резултати за стойностите на K_T , използвайки (3.6), а черната прекъсната линия представлява апроксимация на експерименталните резултати в диапазона от +21 °C до +49 °C. От получените графики, се вижда, че определената функция (3.6), по която се изменя коефициента K_T в зависимост от температурата, показва достатъчно добро съвпадението с експерименталните резултати. Сравнението на двете криви определя отклонения от експерименталните стойности от порядъка на 7 %. Тези отклонения са в рамките на допустимите за подобни измервания и получената зависимост (3.6) може да бъде използвана в различните модификации на формули за определяне на разстоянието като функция на температурата. Използвайки определената в глава 2 формула (2.31) и получената зависимост за температурния коефициент (3.6) се получава следната обобщена зависимост за разстоянието на действие като функция на температурата:

$$(3.7) \quad R_t = K_T \cdot R_{21} = \frac{T_{\min}}{T_{\min} + \frac{(T - T_{\min})^2}{2T_{\max}}} R_{21}$$

Формула (3.7) може да бъде използвана за определяне на предварителна теоретична оценка на разстоянието на действие на УНВ като се отчита влиянието на околната температура. Стойността за параметъра R_{21} може да бъде изчислена по различни начини, в зависимост от наличната информация, както е показано в т. 2.4.

3.4. Резултати от полеви изпитания – сравнение между теоретични и експериментални резултати

В Таблица 3.12 е показана стойността на разстоянието на разпознаване R при наблюдаване на човешка фигура в цял ръст, получена чрез полеви изпитвания на нощен монокулярът “ПРИЛЕП-М” (Патент 7826, 2013), сравнена с теоретично изчислената стойност чрез получената зависимост (2.52). Условиата, при които са направени полевите изпитвания са:

- време – облачно, липса на звезди и луна, умерен вятър, температура 28 °C
- измерена осветеност с помощта на кръг на Ландолт $3,5 \cdot 10^{-4}$ lx,
- наблюдаван обект – човешка фигура в цял ръст в маскировъчно облекло на фона на сухи храсти и черен междуселски път.

Стойностите на пропускането на атмосферата (0.75) и контрастът (0.2) не са измервани по време на полевите изпитания и са избрани като предполагаемите най-близки стойности, според описаните външни условия на наблюдение.

Таблица 3.12 Стойности за теоретичното и експерименталното разстояние

$A'_{об}$ m^2	D_{ex} m	$f_{об}$ mm	τ_o	S A/lm	δ lp/mm	M	E lx	τ_a	K	T	теорет. стойност	измерена стойност	Δ
ЕОП: XX1940											R, m	R, m	%
0,28	0,018	25,17	0,8	0,00055	50	20	0,00035	0,75	0,20	29	287	308	7.32

Относителната разлика, между теоретично изчисленото разстояние на разпознаване при околна температура от 28 °C и реално полученото чрез измерване при същата температура е:

$$(3.8) \quad \Delta = \left| \frac{R_{\text{теоретично}} - R_{\text{експериментално}}}{R_{\text{теоретично}}} \right| 100 = 7.32 \, \%.$$

Сравнението на резултатите, получени при реални полеви изпитания на произведен прототип на ОНВ, с теоретично изчислените при същите условия, показва относителна разлика от 7.32 %. За целите на предварителната теоретична оценка на разстоянието на действие на УНВ, грешка в рамките под 10 % може да се счита за приемлива.

3.5. Тестване на предложената методология за определяне на различни комбинации на външните условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ

За проверка на предложената методология са използвани два типа УНВ – очила за нощно виждане и прицел с каталожни данни, показани в Таблица. 3.13.

Таблица 3.13. Каталожни данни на УНВ

Разделителна способност lp/mm	Отношение сигнал-шум, безразмерно	Фотокатодна чувствителност, A/lm	Диаметър на входната зеница, m	Фокусно разстояние, mm	Разстояние на откриване, m
Очила за нощно виждане – MVP-MV14BGP*					
64	21	0.001350	0.018	26	300
Weapon Sight – MV-740**					
64	24	0.001800	0.018	100	425

Internet resources: * http://www.morovision.com/night_vision_goggles/MVP-MV-14BGP.htm

** http://morovision.com/weapons_sights/MVPA-MV-740-3P.htm

И за двете устройства е прието, че пропускането на обектива е равно на 0.80, минималната фотокатодна чувствителност е $3.4 \times 10^{-12} A/lm$, а атмосферното пропускане е 0.71. Границите на изменение на външните условия на наблюдение са:

- нощна осветеност E се променя в интервала от звездно небе до пълнолуние ($0.00013 \leq E \leq 0.013 lux$);
- контраст между обекта и фона K се променя в интервала $0.1 \leq K \leq 0.5$;
- редуцирана площ на наблюдавания обект, съгласно критериите на Джонсън (Russell & Lombardo, 1998): 1) джип ($A_{jeep} = 2.47 m^2$); 2) камион ($A_{truck} = 5.9 m^2$) и 3) танк ($A_{tank} = 10 m^2$).

Използвайки предложената методология в т. 2.5, след като се вземе наличната информация от каталожните данни и се определят граничните стойности на външните условия на наблюдение, се формулират съответните задачи за определяне на граничните условия, както е показано:

Задача 1а:

$$(3.9) \quad \begin{cases} \max E = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a K A_{target}} \right) \\ \min K = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a E A_{target}} \right) \end{cases}$$

при ограничения:

$$(3.10) \quad 0.00013 \leq E \leq 0.013$$

$$(3.11) \quad 0.1 \leq K \leq 0.5$$

$$(3.12) \quad A_{jeep} = 2.47; A_{truck} = 5.9; A_{tank} = 10$$

Задача 2а:

$$(3.13) \quad \begin{cases} \max K = \left(\frac{R^2 M \Phi_{\min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a E A_{target}} \right) \\ \min E = \left(\frac{R^2 M \Phi_{\min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a K A_{target}} \right) \end{cases}$$

при същите ограничения.

Съгласно методологията, следващият етап е избор на метод за тяхното решаване. Избран е методът на претеглената сума (Marler & Arora, 2004; Andersson, 2000) за решаване на формулираните по-горе задачи, според който Задача 1а се трансформира като:

$$(3.14) \quad \max(w_1 E' + w_2 K')$$

при ограничения (3.8) – (3.10) и $\sum_i w_i = 1$,

където $E' = \frac{E - E^{\min}}{E^{\max} - E^{\min}}$, $K' = \frac{K^{\max} - K}{K^{\max} - K^{\min}}$ са нормализираните параметри за осветеността и контраста.

Аналогично, Задача 2а се трансформира като:

$$(3.15) \quad \max(w_1 E' + w_2 K')$$

при ограничения (3.10) – (3.12) и,

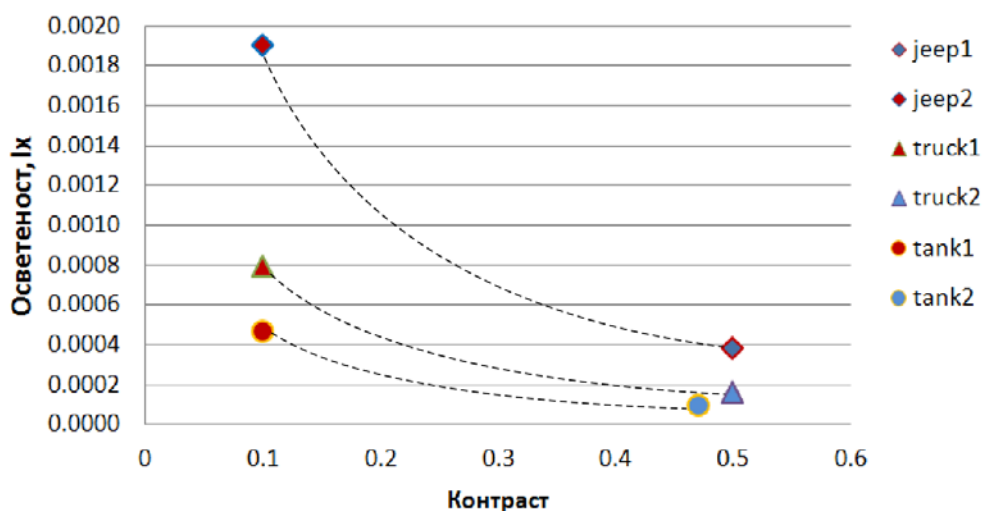
където $\sum_i w_i = 1$, а $K' = \frac{K - K^{\min}}{K^{\max} - K^{\min}}$ и $E' = \frac{E^{\max} - E}{E^{\max} - E^{\min}}$ са нормализираните параметри.

Резултатите от решаването на Задача 1а и Задача 2а, определящи гранични условия за нощна осветеност и контраст за четири различни типа наблюдавани обекта, са показани в Таблица 3.14.

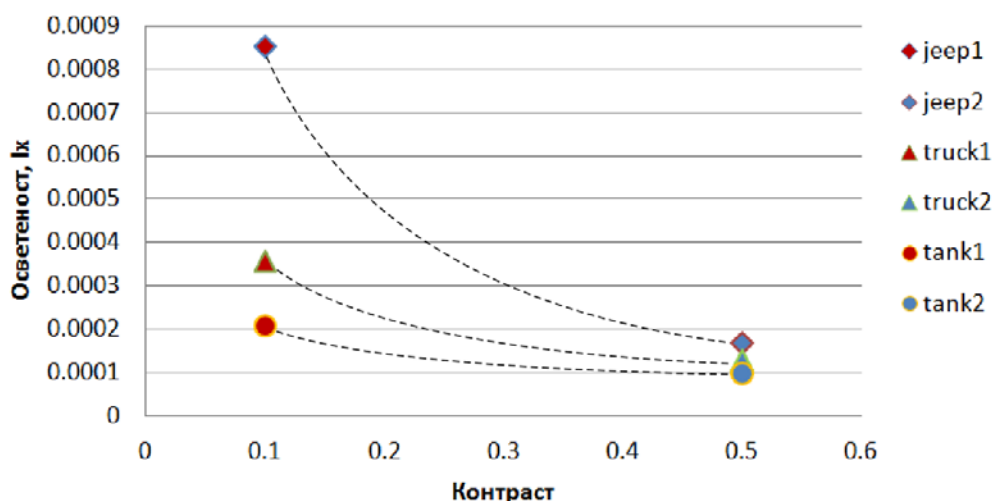
Таблица 3.14. Резултати за гранични точки на осветеността и контраста

УНВ	Тип на наблюдавания обект	Осветеност, lux	Контраст, безразмерно	Разстояние на откриване, m
Night vision goggles MVP-MV14BGP	Задача 1: (max E, min K, w ₁ =0.50, w ₂ =0.50)			
	(A _{jeep} = 2.47)	0.00190	0.10	300
	(A _{truck} = 5.9)	0.00079	0.10	
	(A _{tank} = 10)	0.00047	0.10	
	Задача 2: (min E, max K, w ₁ =0.50, w ₂ =0.50)			
	(A _{jeep} = 2.47)	0.00038	0.50	300
	(A _{truck} = 5.9)	0.00016	0.50	
	(A _{tank} = 10)	0.00010	0.47	
	Задача 1: (max E, min K, w ₁ =0.50, w ₂ =0.50)			
	Weapon sight MV-740	(A _{jeep} = 2.47)	0.00085	0.10
(A _{truck} = 5.9)		0.00035	0.10	
(A _{tank} = 10)		0.00021	0.10	
Задача 2: (min E, max K, w ₁ =0.50, w ₂ =0.50)				
(A _{jeep} = 2.47)		0.00017	0.50	425
(A _{truck} = 5.9)		0.00013	0.50	
(A _{tank} = 10)		0.00010	0.50	

Диапазоните на изменение на естествената нощна осветеност и контраста за два вида уреди за нощно виждане и за четирите различни типа наблюдавани обекта са показани графично на Фиг. 3.24 и Фиг. 3.25.



Фиг.3.24. Изменение на осветеността и контраста за ОНВ



Фиг. 3.25. Изменение на осветеността и контраста за прицел

Както може да се види от Фиг. 3.24 и Фиг. 3.25, съществува повече от една комбинация на естествената нощна осветеност и контраста за даден тип наблюдаван обект, съответстващ на едно и също разстояние на откриване и за едно и също устройство. От тези криви е възможно да се оцени ефективността на конкретното УНВ по отношение на типа на наблюдавания обект и диапазона на изменение на нощната осветеност и контраста. Например, при нощна осветеност от 0.0038 lx (Фиг. 3.24 и Фиг. 3.25) разстояние на откриване от 300 m при ОНВ може да бъде постигнато при контраст от 0.12 (за танк), при контраст от 0.21 (камион) и при контраст от 0.42 (джип), но човешка фигура на разстояние от 300 m при зададената осветеност не може да бъде открита. В случая на прицел с разстояние на откриване от 425 m , при стойност

на контраста от 0.28, откриването на танк може да бъде постигнато при осветеност от 0.0005, за камион при осветеност от 0.001, за джип при осветеност от 0.0024 и за човешка фигура в цял ръст при осветеност от 0.0088.

Описаната методология е тествана и в случая, когато се отчита влиянието на температурата на околната среда. Съответните гранични условия се определят от следните задачи.

Задача 1б:

$$(3.16) \quad \begin{cases} \max E = \left(\frac{R^2 \mu \Phi_{np.фк} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f'_{об} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot \delta_E \cdot A_{об} \cdot K} \right) \\ \min K = \left(\frac{R^2 \mu \Phi_{np.фк} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f'_{об} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot \delta_E \cdot A_{об} \cdot E} \right) \end{cases}$$

при ограничения:

$$(3.17) \quad 0.00013 \leq E \leq 0.013$$

$$(3.18) \quad 0.1 \leq K \leq 0.5$$

$$(3.19) \quad A_{target} = 0.72$$

Задача 2б:

$$(3.20) \quad \begin{cases} \max K = \left(\frac{R^2 \mu \Phi_{np.фк} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f'_{об} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot \delta_E \cdot A_{об} \cdot E} \right) \\ \min E = \left(\frac{R^2 \mu \Phi_{np.фк} \cdot T^2}{0.07 \cdot D_{ex} \cdot f'_{об} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot S \cdot \delta_E \cdot A_{об} \cdot K} \right) \end{cases}$$

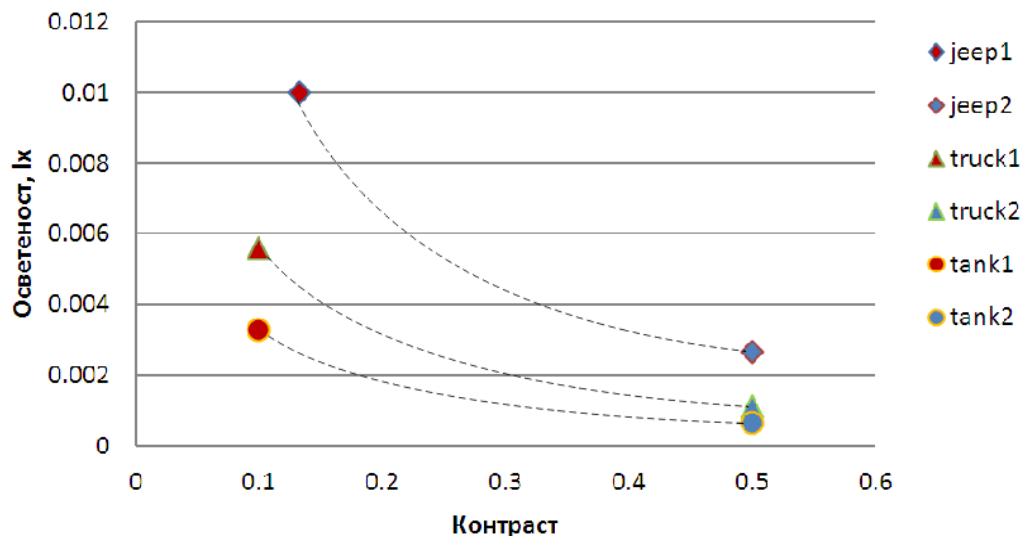
при същите ограничения (3.17) – (3.19).

Получените теоретични изчисления за стойност на температурата 28 °С са показани в Таблица 3.15.

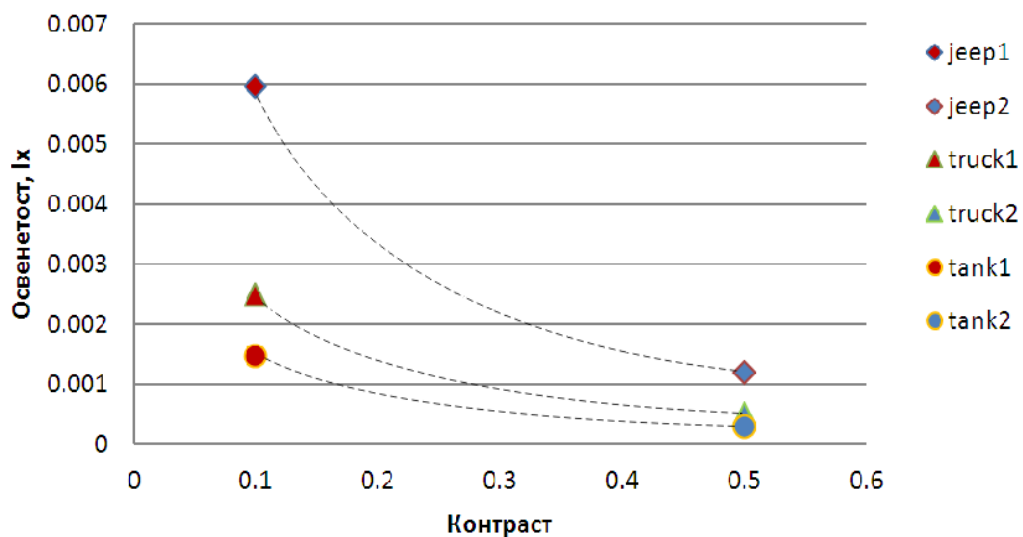
Таблица 3.15. Резултати за гранични точки на осветеността и контраста

УНВ	Тип на наблюдавания обект	Осветеност, lux	Контраст, $безразмерно$	Температура, $^{\circ}C$	Разстояние на откриване, m
Night vision goggles MVP-MV14BGP	Задача 1: ($max E, min K, w_1=0.50, w_2=0.50$)				
	$(A_{jeep} = 2.47)$	0.01000	0.133	28	300
	$(A_{truck} = 5.9)$	0.00558	0.10		
	$(A_{tank} = 10)$	0.00329	0.10		
	Задача 2: ($min E, max K, w_1=0.50, w_2=0.50$)				
	$(A_{jeep} = 2.47)$	0.00266	0.50	28	300
	$(A_{truck} = 5.9)$	0.00112	0.50		
	$(A_{tank} = 10)$	0.00066	0.50		
	Задача 1: ($max E, min K, w_1=0.50, w_2=0.50$)				
Weapon sight MV-740	$(A_{jeep} = 2.47)$	0.00596	0.10	28	425
	$(A_{truck} = 5.9)$	0.00249	0.10		
	$(A_{tank} = 10)$	0.00147	0.10		
	Задача 2: ($min E, max K, w_1=0.50, w_2=0.50$)				
	$(A_{jeep} = 2.47)$	0.00119	0.50	28	425
	$(A_{truck} = 5.9)$	0.00049	0.50		
	$(A_{tank} = 10)$	0.00029	0.50		

Получените резултати са илюстрирани на Фиг. 3.26 и Фиг. 3.27.



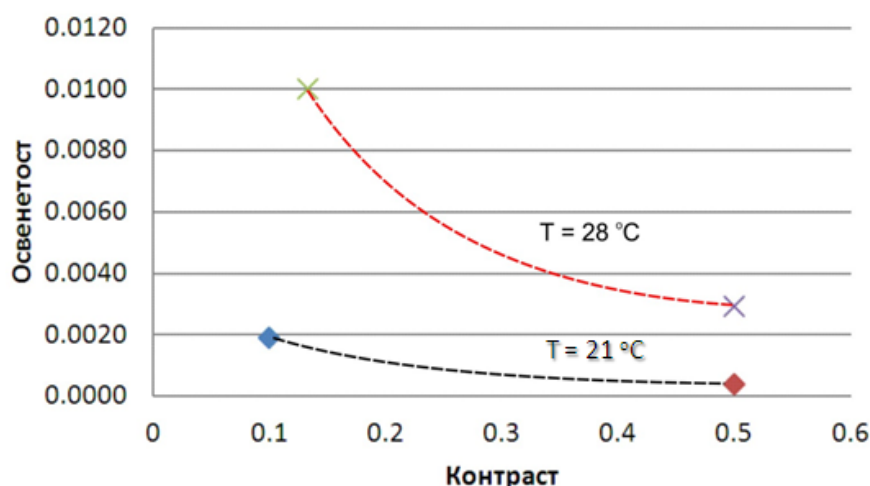
Фиг. 3.26. Изменение на осветеността и контраста за ОНВ при $T=28^{\circ}\text{C}$



Фиг. 3.27. Изменение на осветеността и контраста за прицел при $T=28^{\circ}\text{C}$

От всички показани графики може да се направи извода, че с увеличаване на температурата разстоянието на действие намалява, независимо от типа на уреда за нощно виждане – очила или прицел.

За по-голяма нагледност на получените резултати е направено сравнение при различни температури за един и същ наблюдаван обект в случая на използване на очила за нощно виждане. На Фиг. 3.28 са показани диапазоните на изменение на осветеността и контраста в случая на наблюдаван обект – джип, при еталонна температура 21 °C и температура 28 °C.



Фиг. 3.28. Изменение на осветеността и контраста за ОНВ при наблюдаван обект – джип и при различни температури, реализиращи едно и също разстояние на действие

От Фиг. 3.28 се вижда, че за постигане на едно и също разстояние на действие (300 m) при наблюдаване на един и същ обект (джип), с увеличаване на околната температура са необходими по-високи стойности на контраста и осветеността. Това доказва, че повишаването на температурата влошава параметрите на ЕОП и на уреда за нощно виждане.

3.6. Описание на прототип на уеб-базирано приложение за оценка на параметрите на проектираните УНВ в зависимост от температурата

Предложеният прототип на уеб-базирано приложение може да бъде илюстрирано с помощта на трислойна структура, както е показано на Фиг. 3.29 (Borissova и др, 2014).



Фиг. 3.29. Структура на уеб-базирано приложение

Презентационният слой (потребителски интерфейс) дава на потребителя достъп до приложението. Той осигурява прякото взаимодействие с потребителя и изпращането на заявки към бизнес слоя. Бизнес слойът служи за обработка на данните и работните процеси. Той комуникира както с презентационният слой, така и с базите данни. Слой за данни комуникира само с бизнес логиката и служи за съхранение

данни. Посредством интерфейса се предоставя лесен начин за формиране на необходимата функционалност на уеб-приложението. Освен това посредством него се достига да необходимата информация за данните на съответните модули. Слойът за бизнес логика реализира логиката на самото уеб приложение, контролира функционалността на приложението, като извършва различни процеси по обработката на данните. Този слой координира приложението, прави логически решения, извършва изчисления обработка команди, когато потребителят активира някаква функция или натисне бутон. Този слой осъществява връзката между презентационния слой и слоя с данни. В слойът за данните съхранява и постъпва информацията. Информацията се предава от и към логическия слой за обработка и след това се предава обратно към потребителя. Въведените данни за параметрите на модулите се използват, за да се направят съответните изчисления, които да са визуализират. Алгоритъмът за проектиране на различни типове УНВ при зададени външни условия, вкл. и температурата на околната среда, е реализиран в изследователски прототип, чийто основен потребителски интерфейс е показан на Фиг. 3.30.

The screenshot displays the main interface of the NV Goggles application. At the top, there are buttons for 'Main menu', 'Print', 'Help', and 'About'. Below these, a navigation bar shows 'NV Goggles' as the selected option, with 'NV Binoculars' and 'NV Sight' as alternatives. The interface is divided into several sections:

- Input Parameters:** A row of dropdown menus for 'IIT', 'Objective', 'Ocular', 'El. batteries', 'El. batteries number', 'Target type', 'Ambient light', 'Contrast', 'Atm. transmittance', and 'Temperature'.
- Parameter Tables:**
 - IIT Table:** Includes 'Limiting resolution, [lp/mm]', 'Luminous sensitivity, [μA/lm]', 'Signal/noise ratio', 'Weight, [gr]', and 'Price, [\$]'.
 - Objective Table:** Includes 'Focal length, [mm]', 'F-number', 'Transmittance', 'Field of view, [degree]', 'Focus range, [mm]', 'Weight, [gr]', and 'Price, [\$]'.
 - Ocular Table:** Includes 'Diopter adjustment, [dpt]', 'Eye relief, [mm]', 'Focal length, [mm]', 'Weight, [gr]', and 'Price, [\$]'.
 - Battery Table:** Includes 'Capacity, [mA/h]', 'Number', and 'Price, [\$]'.
- Calculation Results:** A section with a 'Reset' button and a 'Calculation' button. Below the 'Calculation' button, there are input fields for 'NVD detection range, [m]', 'NVD recognition range, [m]', 'NVD identification range, [m]', and 'NVD magnification, [x]'. To the right, there are output fields for 'El. battery power supply lifetime duration, [h]', 'El. battery number', 'Weight of the NVD optoelectronic channel, [gr]', and 'Price of the NVD optoelectronic channel, [\$]'.

Фиг. 3.30. Основен екран на прототипа

Посредством съответни бутони потребителят може да избере само един вид уред за нощно виждане – очила, бинокли или прицели. Една част от менюта са предназначени за избор на основните модули за УНВ (ЕОП, обектив със съответен окуляр, ел. батерии), а в друга част – за избор на различни външни условия за наблюдение (наблюдаван обект, естествената нощна осветеност, контраст, пропускане на атмосферата и температура). При избор на всеки модул, неговите параметри се показват в съответни текстови полета. Изчисляването на разстоянието на действие,

увеличението, теглото, цената и времето за непрекъсната работа на УНВ става чрез съответните формули. При избор на конкретен модул за УНВ, неговите параметри се показват в определените за целта текстови полета.

Останалата част от интерфейса има за цел да визуализира резултатите от направените избори. Посредством бутона (Calculation) се реализират съответните изчисления, като резултат на направения избор за вида на УНВ, за модулите и за външните условия на наблюдение.

Разработеният прототип е тестван с ограничен брой модули, за да се илюстрира неговата приложимост. Като бъдеща работа е предвидено усъвършенстване предложения прототип и тестване на неговата работоспособност на различни операционни системи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дисертационния труд са разгледани подробно параметрите, конструктивните особености и съвременните технологични решения на ЕОП -, който представлява основния модул на УНВ, определящ съществени характеристики на тези уред. За определяне на характеристиките на УНВ като цяло, е необходимо да се отчитат както вътрешните параметри на конструктивните елементи на УНВ, така и външните условия на наблюдение. В тази област, особено актуални са изследванията за влиянието на температурата върху параметрите на УНВ.

Увеличаването на *тока на тъмно* влияе на параметъра *отношение сигнал/шум*, на ЕОП, който от своя страна зависи от материала на фотокатода и от шумовия фактор на ЕОП. Поради това, *токът на тъмно* и параметърът *отношение сигнал/шум* на ЕОП, играят важна роля за определяне на интегралното ниво на светлинните шумове, чрез които се определят праговете възможности на уредите за нощно виждане.

За да се отчете влиянието на температурата, в настоящия дисертационен труд е въведен температурно зависим коефициент K_T , който отразява връзката между разстоянието на действие на УНВ и повишаването на околната температура. Използвайки основното уравнение на енергетичния разчет за работа на УНВ е изведена математическа зависимост, отчитаща влиянието на температурата върху параметрите на УНВ. Въведеният температурно зависим коефициент позволява да бъдат модифицирани формулите за определяне на разстоянието на действие, като се отчита и влиянието на околната температура. Получените математически зависимости са използвани в разработена методология за определяне на възможни комбинации от външни условия на наблюдение, осигуряващи едно и също разстояние на действие на конкретно устройство с определени технически характеристики, съгласно неговите каталожни данни. Методологията се базира на формулирането на съответни математически задачи. Предложен и описан е алгоритъм за предварителна теоретична оценка на проектираните УНВ, отчитайки конкретни външни условия на наблюдение, включително и температурата. Разработеният алгоритъм за проектиране на различни типове УНВ, взема предвид зависимостите между отделните модули, спецификата на различните типове УНВ и също така отразява основни изисквания на потребителя.

Описани са проведените теоретични и експериментални изследвания, с цел установяване на практическата приложимост на въведения температурно зависим коефициент и са получените формулировки за определяне на разстоянието на действие като функция на температурата. Описани са проведените експериментални изследвания за влиянието на температурата върху параметрите на конкретен уред за нощно виждане. За целите на експерименталните изследвания е разработен високоволтов импулсен преобразовател на напрежение за захранване на електронно-

оптичния преобразувател. От проведените експериментални изследвания следва обобщението, че промените в параметрите на ЕОП, респективно в параметъра *разстояние на действие* на нощния уред, вследствие на повишаване на температурата, се забелязват при ниски нива на осветеност – в границите 10^{-6} - 10^{-7} lx. Когато осветеността на обекта нарасне достатъчно и превиши тези стойности, параметрите на ЕОП практически престават да зависят от температурата. В този случай, разстоянието на действие на уреда за нощно виждане, остава константа и не зависи от нарастването на температурата. На база на проведените експериментални резултати е определена математическата функция на температурно зависимият коефициент K_T , вземайки предвид стойността на околната температура, при която се провеждат наблюденията и отчитайки температурния диапазон на работа на ЕОП. Така определената математическа функция на температурния коефициент K_T може да бъде използвана съвместно с формулите за определяне на разстоянието на действие на УНВ, за получаване на предварителни теоретични оценки при отчитане на влиянието на температурата.

Представени са сравнения на резултати от полеви изпитания и резултати от теоретични изчисления чрез определената математическата зависимост на температурния коефициент. Описани са резултати от численото тестване на предложената методология за определяне диапазона на изменение на външните условия, при които уредът има едно и също разстояние на действие. Описан е разработен изследователски прототип на уеб-базирано приложение за оценка на параметрите на проектираните УНВ, като се отчита и влиянието на околната температура.

Изследванията по дисертацията и получените резултати са отразени в 5 публикации и 2 свидетелства за промишлен дизайн.

Постигнатите резултати в дисертационния труд очертават следните насоки за бъдещи изследвания в областта на УНВ: 1) Изследване разстоянието на действие на УНВ при повишаване на температурата за ЕОПи с различен материал на фококатода, с цел сравнение на получените резултати; 2) Разработване на цялостна програмна за оценка на параметрите на УНВ в зависимост от температурата.

ПРИНОСИ

От получените резултати при провеждане на научните изследвания в настоящия дисертационен труд могат да се формулират следните научни и научно-приложни приноси:

1. Методът на енергетичния разчет за определяне на разстоянието на действие на УНВ е допълнен по отношение влиянието на температурата на околната среда. За определяне на влиянието на температурата върху параметрите на УНВ е въведен температурно зависим коефициент K_T . На база на проведени експериментални изследвания е определена функционална зависимост на коефициента K_T при изменение на стойностите на околната температура в допустимия температурен диапазон на работа на УНВ. Температурно зависимият коефициент K_T е използван за определяне на разстоянието на действие като функция на температурата на околната среда. Въведеният температурно зависим коефициент K_T може да бъде използван и при други подходи, определящи разстоянието на действие на уреда, като се отчита околната температура.
2. В резултат на теоретичен анализ и експериментални изследвания, в настоящия дисертационен труд се предлага основните фактори, които допринасят за големината на тока на тъмно (респективно за еквивалентната фоновата осветеност), да се структурират на три основни групи, в зависимост от начина, по който се осъществява влиянието на конкретният фактор върху тока на тъмно. Във втора група попадат фактори, които имат механично-оптичен характер. В третата група се намират специфични електрически параметри на ЕОП и технологични особености на конструкцията на високоволтовия преобразувател на електрически потенциал.
3. Предложена е методология за определяне на различни комбинации на външните условия на наблюдение, вкл. и температурата на околната среда, съвместими с техническите спецификации на УНВ, дадени в каталога на устройството. Методологията се базира на формулирането и решаването на съответни математически задачи.
4. Предложен е алгоритъм за проектиране на УНВ. Този алгоритъм може да се използва при проектиране на различни типове УНВ при зададени външни условия, в т.ч. температура на околната среда и позволява предварителна оценка на параметрите на проектираното устройство. Алгоритъмът е реализиран в изследователски прототип на уеб-базирано приложение.
5. За целите на експерименталните изследвания за влияние на температурата върху параметрите на УНВ, е разработен специализиран високоволтов импулсен преобразувател на напрежение за хранване на електронно-оптичния преобразувател на УНВ.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Bantutov E. An approach for estimation of night vision devices performance in respect of temperature variation. *International Journal Advanced Modeling and Optimization*, ISSN: 1841-4311, Vol. 16, No 2, 2014, pp. 261-268.
2. Борисова Д., Е. Бантутов, И. Мустакеров. Подход за определяне на теоретичните параметри на уреди за нощно виждане с отчитане влиянието на температурата. *Int. Conf. AUTOMATICS AND INFORMATICS'2014*, Proc. ISSN 1313-1850, CD:ISSN 1313-18, 2014, стр. I-47-I-50.
3. Borissova D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Methodology for determining of surveillance conditions in relation to night vision devices performance. *International Journal Advanced Modeling and Optimization*, ISSN: 1841-4311, Vol. 16, No 1, 2014, pp. 51-59.
4. Borissova D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Web-based architecture of a system for design assessment of night vision devices. *International Journal of Information Science and Engineering*, pISSN 2010-376X, eISSN 2010-3778, Vol.7, No7, 2013, pp. 62-67.
5. Borissova D., M. Dekov, D. Kozarev, E. Bantutov, I. Iliev. Optical-electronic device – night vision goggles – “Prilep”. *Cybernetics and Information Technologies*, ISSN: 1311-9702, Vol. 1, No 1, 2001, pp. 108-115.

Патенти във връзка с дисертационния труд

6. Свидетелство за промишлен дизайн # 7826/25 юни 2013 г. – приспособление за нощно гледане – Евгени Бантутов и колектив.

ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Долуподписаният Евгени Димитров Бантутов декларирам, че настоящият дисертационен труд е лично мое дело и че добросъвестно съм посочил всички използвани източници.

1. Резултатите и приносите, които представям в научната разработка по процедурата, са оригинални и не са заимствани от изследвания и публикации, в които нямам участия.

2. Представената от мен информация във вид на копия на документи и публикации, лично съставени справки и др. съответства на обективната истина.

3. Декларирам също така, че съм спазил изискванията за авторско право по отношение на използваните източници и не съм използвал неправомерно чужди текстове, без да посоча техния автор и източник.

4. Настоящият дисертационен труд не е представян за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

инж. Е. Бантутов:

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Айнщайн А. Избрани произведения Издателство „Наука и изкуство“ София 1988
2. Айнщайн А. Собрание научных трудов Издателство „Наука“ Москва 1967
3. Айнщайновский сборник. 1986-1990 Москва „Наука“ 1990.
4. Военен стандарт „Мороз“, група Н14, която се отнася за изпитания на мобилни електронно-оптични и оптично-механични военни изделия.
5. Вълева Е. Техническа оптика, част 1, изд. Техника, 1993, 229 стр.
6. Гоев А. И. Модернизация уредов ночногo видения, Специална техника, № 2, 2002, стр. 11–14.
7. Госсорг. Ж. Г. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Москва. Мир, ISBN 5-03-000915-9, 1988, 416 стр.
8. ГОСТ 15114-78 – Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения, 1999, <http://www.gosthelp.ru/gost/gost32484.html>
9. Григорьев А. А., Н. Ф. Кошавцев, И. Б. Кривошапкин. Установка и метод определения дальности действия уредов ночногo видения без полевых испытаний, XVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и уредам ночногo видения, г. Москва, Россия, 2000, стр. 81-90.
10. Гурский И.П. Элементарная физика с примерами решения задач. Москва „Наука“ 1989
11. Дорфман Я.Г. История на физиката (том 2 от началото на 19 до средата на 20 век) Наука и изкуство София, 1982
12. Елизаренко А. С., Ю. Б. Парвулюсов, В. П. Солдатов, Ю. Г. Якушенков, Проектирование оптико-электронных уредов, Москва, Машиностроение, 1981, 262 стр.
13. Зайдел, И. Н., Г.И. Куренков. „Електронно оптические преобразуватели“ М. Сов. Радио 1970
14. Изнар А. Н., А. В. Павлов, Б. Ф. Федоров. Оптико-электронные уреды космических аппаратов М., Машиностроение, 1972.
15. Илиев И., М. Деков, Д. Козарев, Д. Борисова, Е. Бантутов, И. Бошнаков. Приспособление за ночно виждане. Свидетелство за промишлен дизайн, № 4385, регистрирано на 05.04.2002 г.
16. Коновалов П. И. Повышение качества бипланарных электронно-оптических преобразувателей по параметру отношение сигнал/шум за счет разработки новых технологических режимов операции финишной обработки. Диссертация в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана, 2010.
17. Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных уредов. Методические указания, Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012.
18. Кошавцев Н.Ф., А.Н. Кошавцев, С.Ф. Федотова, К вопросу о дальности опознавания в низкоуровневых системах визуализации изображений, Прикладная физика, № 4, 1999, стр. 46-52.
19. Кривошапкин И. Б., Ю. Г. Эдельштейн, Обработка результатов полевых испытаний методом множественной корреляции. Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям, Москва, 1998, стр. 72-77.
20. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники Москва „Советское радио“ 1978
21. Максвелл Дж.К. Избрание сочинения по теорий електромагнитного поля Москва.1954
22. Малинин В.В., Математическое моделирование процессов и систем на ЭВМ, Центр информационных технологий Сибирской государственной геодезической академии, г. Новосибирск, 2003, <http://www.ssga.ru/metodich/matmod/contents.html>.
23. НОВОЕ СТАРОЕ ПОКОЛЕНИЕ <http://www.ykonoptics.ru/novoe-staroe-pokolenie-obzor-osobennostej-srednebyudzhetyh-pnv-zhurnal-rog-5-2011.html>
24. Патент # 7826/25 юни 2013 – приспособление за ночно гледане – колектив: Б. Бантутова, Д. Борисова, Е. Бантутов, И. Мустакеров
25. Патент # 7827/25 юни 2013 – приспособление за ночно гледане – колектив: Б. Бантутова, Д. Борисова, Е. Бантутов, И. Мустакеров
26. Петров, А., С. Петров. Квантова механика. Изд. „Наука и изкуство“ София 1989
27. Пономарьов Л.И. „Под знака на кванта“ Издателство Наука и Изкуство София 1989
28. Разумовский И. Т., Уреды ночногo видения – Электронный учебник по дисциплине: “Специальные оптические уреды” Версия: 1, СПб ГИТМО (ТУ), кафедра КиПОП, Санкт-

- Петербургский Государственный Институт Точной Механики и Оптики (Технический Университет), 2001, http://cde.ifmo.ru/bk_netra/cgi-bin/ebook.cgi?bn=26
29. Райчева С. Физикохимия 2 част. Увод в квантовата химия. Издателство „Наука и изкуство“ София 1990
 30. Стандарт ISO 8596 – “Оптика и оптически уреди”
 31. Сухопаров С.А., Б.А. Пизюта. Дальность действия уредов ночного видения пассивного типа, Сб. “Точность и надежность оптико-механ. уредов”, ЛИТМО – 1973. № 1. стр. 16 – 21
 32. Сухопаров, С.А., Б.А. Пизюта. К вопросу дальности действия уредов ночного видения, Труды НИИГАиК, 1974. стр. 25 – 32
 33. Тамкул. Дальность действия пассивных ОЭП обнаружения, наведения и самонаведения. 1972.
 34. Технические характеристики на микроканални пластини. <http://www.baspik.com/products/mop/>
 35. Тымкул В. М., Л.В. Тымкул. Оптико-электронные уреды и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск 2005
 36. Тымкул В. М., Методы энергетического расчета оптико-электронных уредов и систем, Учебное пособие, 2001
 37. Тымкул, В.М. Методы энергетического расчета оптико-электронных уредов и систем. Новосибирск, НИИГАиК, 1993.
 38. Тымкул, В.М. Энергетический расчет оптико-электронных уредов и систем. Теория и методы: Учеб. пособие, Новосибирск: НИИГАиК, 1993..
 39. ФЕУ 6М, <http://www.baspik.com/news/412/>
 40. Фулър Х., Фулър Р. Физиката в живота на човека. Наука и изкуство, София, 1988.
 41. Эволюция уредов ночного видения, <http://www.yukonoptics.ru/evolyuciya-priborov-nochnogo-videniya-rossijskij-oruzhejnyj-zhurnal-ruzhe-06-2006.html>
 42. Яворский Б.М., А.А.Детлаф. Справочник по физике Издателство „Наука” 1971
 43. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных уредов. М., Логос, 1999.
 44. Якушенков Ю. Г. Теория и расчёт оптико-электронных уредов: Учебник. М., Логос, 2011
 45. Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных уредов. М., Логос, 2000.
 46. 3-Bar Resolving Power Test Chart, <http://www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/TestTargets/>
 47. A Basic Guide to Night Vision, Cobra Optics Ltd., 2001, pp. 10.
 48. Andersson J. A survey of multiobjective optimization in engineering design. Technical report LiTH-IKP-R-1097, 2000.
 49. ARMY MIL-I-49428 CANC NOTICE 1-1997 image intensifier assembly, 18 mm, microchannel wafer mx-10160/avs-6
 50. Bai X., L. Yin, Y.Zhu, Y. He, Z. Miao, W. Hu, Z. Hou, H. Shi. High illumination resolution test of low-light-level image intensifier. Proc. SPIE 8912, Low-Light-Level Technology and Applications, 89120L (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2033671
 51. Bantutov E. An approach for estimation of night vision devices performance in respect of temperature variation. Int. J. Advanced Modeling and Optimization, Vol. 16, No 2, 2014, pp. 261-268
 52. Bender E. J., M. V. Wood; S. Hart; G. B. Heim, J. A. Torgerson. Characterization of photocathode dark current vs. temperature in image intensifier tube modules and intensified televisions. Proc. SPIE 5563, Infrared Systems and Photoelectronic Technology, 2004, doi: 10.1117/12.562811.
 53. Bender, E. J., M. V. Wood, D. J. Hosek, S. D. Hart. Characterization of domestic and foreign image intensifier tubes. Proc. SPIE, Vol. 8706, 2013, DOI: 10.1117/12.2015462
 54. Berezovsky A., S. R. Salomão, D. G. Birch. Pupil size following dark adaptation in patients with retinitis pigmentosa. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 34, 2001, pp. 1037-1040.
 55. Bijl P., J. M. Valetton. Validation of the new triangle orientation discrimination method and ACQUIRE model predictions using observer performance data for ship targets, Optical Engineering, 1998, Vol. 37(07), Ed.: Donald C. O'Shea, 1998, pp. 1984-1994.
 56. Borissova D. A Single Criterion Combinatorial Optimization Model of the Monocular Night Vision Goggles Battery Power Supply Choice. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, Vol. 57, 2006, pp. 95-101.
 57. Borissova D., E. Bantutov, I. Mustakarov. Approach for Determination the Theoretical Parameters of Night Vision Devices Considering the Temperature Influence. International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'2014

58. Borissova D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Methodology for determining of surveillance conditions in relation to night vision devices performance. *Int. J. Advanced Modeling and Optimization*, Vol. 16(1), 2014, pp. 51-59.
59. Borissova D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Web-based architecture of a system for design assessment of night vision devices. *Int.J. of Information Science and Engineering*, Vol. 7(7), 2013, pp. 62-67.
60. Borissova D., I. Mustakerov. A generalized optimization method for night vision devices design considering stochastic external surveillance conditions, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, 2009, pp. 4078-4085.
61. Borissova D., I. Mustakerov. A Working Distance Formula for Night Vision Devices Quality Preliminary Information. *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 6, No 3, 2006, pp. 85-92.
62. Borissova D., I. Mustakerov. Multicriteria choice of night vision devices considering the impact of their performance parameters. *Advanced Modeling and Optimization*, Vol. 10(1), 2008, pp. 81-93.
63. Borissova D., M. Dekov, D. Kozarev, E. Bantutov, I. Iliev, Optical- electronic Device – Night Vision Goggles - "Prilep", *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 1(1), 2001, pp. 108-115.
64. Borissova D., M. Dekov, Optical Characteristics of Night Vision Goggles "PRILEP", *Cybernetics and Information Technologies*, Vol 2(1), 2002, pp. 110-115.
65. Bosch L. A. Image intensifier tube performance is what matters. *Proc. SPIE 4128, Image Intensifiers and Applications II*, 2000, doi: 10.1117/12.405867.
66. Bosch L. A., L. Boskma. Performance of DEP Super Generation Image Intensifiers. *Proc. SPIE Airborne Reconnaissance XVIII*, vol. 2272, 1994, pp. 194-202.
67. Cheng Y., F. Shi, L. Yan, Z. Hou, H. Shi, F. Liu, M. Li. Research on calculation of cathode electron scattering radius in the generation III image intensifier. *Proc. SPIE 8912, Low-Light-Level Technology and Applications*, 891212 (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2034314
68. Chrzanowski K. Review of night vision technology. *Opto-electronics review*, Vol. 21(2), 2013, pp. 153-181
69. Cooke A. *Visual Astronomy Under Dark Skies: A New Approach to Observing Deep Space*, Springer, 2005.
70. Cui D., L. Ren, B. Chang, F. Shi, J. Shi, Y. Qian, H. Wang, J. Zhang. Halo performance on low light level image intensifiers. *Proc. SPIE 8761, PIAGENG 2013: Image Processing and Photonics for Agricultural Engineering*, 876108 (4 March 2013); doi:10.1117/12.2019621
71. Datta P.K, P.D. Gupta, O.P. Nijhawan, R. Hradaynath. Influence of temperature on the MTF of cascaded image-intensifier tubes. *Applied Optics*, Vol. 23(12), 1984, pp. 1967-1971.
72. Dayer J. L., K. M. Young. Night Vision Goggle Research and Training Issues for Ground Forces: A Literature Review. Technical report 1082, 1998.
73. DEP – The Delft Electronic Products guide, 2004, <http://www.lahouxoptics.ru/files/editor/file/info/productguide.pdf>
74. Dudzik M. C. *Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing*. Infrared Information Analysis Center & SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington USA, 1993
75. Evaluating the Performance of a Night Vision Scope, http://www.nightvisioncn.com/sdp/625512/4/cp-3235901/0/Evaluating_Night_Vision.html
76. Fu S., B. Sun, Q. Wang, G. Jiao, L. Feng, Y. Li. Simulations on the electron back-scattering characteristics of ion barrier film. *Proc. SPIE 8912, Low-Light-Level Technology and Applications*, 89120P (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2033686
77. Gaussorgues G. *La Thermographie Infrarouge Principes-Technologie Applications Deuxieme edition revue et augmentee Technique et Documentation Lavoisier*, Paris 1977
78. Gul N., M. Efe. Improved analytical modulation transfer function for image intensified charge coupled devices. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol.18, No.1, 2010, doi:10.3906/elk-0811-9.
79. Hamamatsu image intensifiers, http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/II_TII0004E02.pdf
80. High-Voltage-Power-Supplies, Proxivision, 2003, <http://www.proxivision.de/datasheets/High-Voltage-Power-Supplies-PR-0054E-03.pdf>
81. Higginbotham K. D. Effect of using high signal-to-noise image intensifier tubes on night vision goggle (NVG) aided visual acuity, USA, Master's Thesis. (2006)
82. High Performance Image Intensifiers, 2011, <http://www.proxivision.de/datasheets/image-intensifier-general-information.pdf>
83. Holst G. C. *Electro-Optical Imaging System Performance*. J C D Publishing, 2008.
84. Homeland Security, 2007, <http://www.nightvision.com/resources/downloads/HSCatalog.pdf>

85. Hynecek, J. Impactron – A New Solid State Image Intensifier, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol. 48, No. 10, 2001.
86. Ientilucci E.J. Synthetic Simulation and Modeling of Image Intensified CCDs (IICCD) PhD thesis, 2000, <http://www.cis.rit.edu/~ejipci/Reports/EmmettMSThesis.pdf>
87. Image Intensifier Tutorial, http://www.electrophysics.com/View/Viw_TechPrimer_NightVisionTutorial.asp
88. Image intensifiers –products catalog (Hamamatsu), <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/3009/index.html?nfxsid=54170c7b7b5491410796667&gclid=COyEy4qhgcECFagfwod9o4AjA>
89. Image Intensifiers – SBS Holding, http://www.sbs-holding.com/file/uv_image_intensifier_40_mm.pdf?PHPSESSID=8f89dde5e1323a70c02a851dcb66bc7c
90. Image intensifiers, <http://www.photek.com/products/image-intensifiers.html>
91. Image Intensifiers, Photonis, <http://www.photonis.com/>
92. Image-intensifier-general-information PROXITRONIC Detector Systems GmbH 2011
93. Indiso, S. B. The transmittance of the atmosphere for solar radiation on individual clear days. J. of Applied Meteorology, vol. 9, pp. 1970, pp. 239-241.
94. ITT – INTERNATIONAL MILITARY CATALOG, Night vision products, 2008, <http://library.outdoorhistory.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/5784/InternationalMilitaryCatalog.pdf?sequence=1>
95. Jiang D. , X. Wang, K. Wu, J. Tian. Performance of Microchannel Plates with Al₂O₃ Ion Barrier Film after High-Temperature Degassing. Symposium on Photonics and Optoelectronic (SOPO), Chengdu 19-21 June 2010, 10.1109/SOPO.2010.5504064
96. Johnson C. B., L. D. Owen. HANDBOOK of OPTICS. Chapter 21: IMAGE TUBE INTENSIFIED ELECTRONIC IMAGING, 2005
97. Koretsky G. M., J. F. Nicoll, M. S. Taylor. A Tutorial on Electro-Optical/Infrared (EO/IR) Theory and Systems. Institute for Defence Analyses. 2013
98. Leachtenauer J. C., R. G. Driggers. Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems: Modeling and Performance Prediction. Artech House, 2001
99. Lombardo R. L. Jr., Target Acquisition: It's Not Just For Military Imaging, Photonics Spectra, July, 1998, pp. 123-126.
100. Marasco P. L., L. Task. Optical Characterization of Wide Field-Of-View Night Vision Devices, Air Force Research Laboratory, Human effectiveness Directorate, ASC99-2354, pp. 6, 1999.
101. Marasco P.L., H. L. Task. The impact of target luminance and radiance on night vision device visual performance testing. In Proc. Helmet- and Head-Mounted Displays VIII: Technologies and Applications, 2003, DOI: 10.1117/12.487869.
102. Marler R.T, J. S. Arora. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and Multidisciplinary Optimization vol. 26, 2004, pp.369-395
103. Marler R.T, J. S. Arora. Transformation methods for multi-objective optimization. Engineering Optimization, vol. 37, 2005, pp. 551-569
104. Marler R.T. and J.S. Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 41, 2010, pp. 853-862
105. Military Standard, MIL-STD-1858
106. MIL-PRF-49052G “Image intensifier assembly, 18 millimeter microchannel wafer, MX-9916/UV, 1999.
107. Morgan K. O. Advances in Electronics and Electron Physics: Photo-electronic image devices: Vol. 64A, Academic Press, 1985, 298 pages
108. Musla A. K., A. K. Jaiswal. Effect of Image Intensifier Tube Equivalent Background Illumination on Range performance of passive night sight. Defence Science Journal, Vol. 57(6), 2007, pp. 877 – 880.
109. Night Vision Devices – Generations, <http://www.intas.org/Nachtsicht/nightvision-gns.htm>
110. Night Vision Goggles Lucie. Проспект на фирмата ANGENIEUX S.A., Франция, 1999.
111. Ohkawara N. Long-term variations of atmospheric transmittance from pyr heliometer measurements. In Proc. 12th BSRN Science and review and workshop, 2012, Potsdam, Germany.
112. Optics Trade, <http://www.opticstrade.com/default.aspx?page>
113. Patent EP 0033574 A1 “Electrical power supply arrangement for image intensifier tubes and combination thereof with an image intensifier tube”, 1981
114. Parameters of image intensifier tubes, http://www.inframet.pl/eimage_intensifier_tubes.htm

115. Photonis night vision XD-4TM, <http://www.photonis.com/>
116. Pinkus A., H. L.Task, Measuring Observers' Visual Acuity Through Night Vision Goggles, ASC98-1884, 25 Aug 1998.
117. Pinkus A., H. L.Task, The Effects of Aircraft transparencies on night vision goggle-mediated visual acuity, ASC00-2308, 14 Aug 1997.
118. ProxiVision image intensifiers , <http://www.proxivision.de/products/image-intensifier.html>
119. Pulsar history, <http://www.pulsar-nv.com/about/history/>
120. Ren L., F. Shi, H. Guo, H. Wang, B. Chang. Numerical calculation method of modulation transfer function for preproximity focusing electron-optical system. Applied Optics, Vol. 52(8), 2013, pp. 1641-1645
121. Resolving Power Target, MIL-STD-150A, Section 5.1.1.7.
122. Riegler J. T., J. D. Whiteley, H. L. Task, J. Schueren. The effects of signal-to-noise ratio on visual acuity through night vision goggles, 1991, AL-TR-1991-001.
123. Robbins M. S., B. J. Hadwe. The Noise Performance of Electron Multiplying Charge-Coupled Devices. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 50, NO. 5, MAY 2003
124. Sabatini R., M.A. Richardson, M. Cantiello, M. Toscano, P. Fiorini, D. Zammit-Mangion, H. Jia. Night Vision Imaging Systems Development, Integration and Verification in Military Fighter Aircraft. Aeronautics & Aerospace Engineering, Vol. 2(2), 2013, doi:10.4172/2168-9792.1000106
125. Schwering P. B. W., R. A. W. Kemp, K. Schutte. Image enhancement technology research for army applications. Proc. SPIE, Vol. 8706, 2013, DOI: 10.1117/12.2017855
126. Seitz P., A. J. P. Theuwissen. Single-Photon Imaging. Springer, 2011, 351 pages
127. Song D., C. Liu, X. Qin, S. Yu, K. Fu, X. Bai, X. Wang, Y. Li, Q. Duanmu. Effect of ion barrier film on the noise characteristics of proximity focusing low-light-level image intensifier. Proc. SPIE 8912, Low-Light-Level Technology and Applications, 89120A (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2032298;
128. Task, H. L., Night Vision Devices and Characteristics. AGARD Lecture Series 187: Visual Problems in Night Operations, 1992, pp. 7-1 – 7-8.
129. Timothy W.S., P. E. Joseph. An analysis of electron scattering in thin dielectric films used as ion barriers in generation III image tubes," SPIE. Vol. 4976, 2003, pp. 23-32.
130. Travis, J. Scoping Out Night Vision. March 1996, <https://www.justnet.org/pdf/nitevisn.pdf>
131. Tube Specifications, http://www.militaryandlaw.com.au/page/tube_specifications.html
132. USAF, http://www.takinami.com/yoshihiko/photo/lens_test/USAF.pdf
133. USAF-1951 test target, <http://www.filmscanner.info/en/Aufloesung.html>
134. XR-5TM Technology Image Intensifier, 18 millimetre 184-3384A0 Auto-gating XX25401
135. Yin L., Xiao-feng Bai, L. Feng, Y. He, X. Gao. Measurement conditions study on MCP current gain of the third generation low-light-level image intensifier tube. Proc. SPIE 8912, Low-Light-Level Technology and Applications, 89120Q (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2033696
136. Zacher J. E., T. Brandwood, P. Thomas, M. Vinnikov, G. Xu, S. Jennings, T. Macuda, S. A. Palmisano, G. Craig, L. Wilcox, R. S. Allison. Effects of image intensifier halo on perceived layout. Proc. SPIE 6557, Head- and Helmet-Mounted Displays XII: Design and Applications, 65570U (1 May 2007); doi:10.1117/12.719892
137. Zhu Y., N. Zhang; D. Li, J. Nie; T. Zhang; X. Liu; Z.Liu; L. Fu. Technology discussion of reducing the equivalent background illumination of Gen III Image Intensifier. Proc. SPIE 8912, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Low-Light-Level Technology and Applications, 89120Z (August 16, 2013); doi:10.1117/12.2034058